

SUBLIMAÇÃO EM UMA CAMADA LIMITE LAMINAR
EM PRESENÇA DE RADIAÇÃO

GERALD PELIKS

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS
PROGRAMAS PÓS-GRADUADOS DE ENGENHARIA DA UNIVERSI-
DADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS RE-
QUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DE GRAU DE
MESTRE EM CIÊNCIA (M.Sc.)

Aprovada por:

Ephraim M. Spamer

John A. Howell

ASL

Agosto de 1967

Aos meus pais dedico esta tese:
à minha mãe, pela bondade que
me inspirou desde pequeno ; ao
meu pai, por suas lições de dig-
nidade. A ambos devo o que sou
e o que venho obtendo pelo estu-
do e pelo trabalho. Esta pesqui-
sa, fruto de esforço e dedica-
ção - sentimentos por êles incu-
tidos em mim - por isso mesmo
lhes pertence.

HOMENAGENS

Ao Professor Ephraim Maurice Sparrow por sua firme e dedicada orientação. Aos Professores Alberto Luiz Coimbra e Francisco Nilo de Farias , respectivamente, Coordenador e Chefe do Programa de Engenharia Mecânica da Co ordenação dos Programas Pós-Graduados de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE-UFRJ) por seu apôio e incentivo. Ao Departamento de Cál culo Científico da COPPE - UFRJ, seu Chefe, Major Tércio Pacitti e Engenheiros Ysmar Vianna e Silva Filho e José Paulo Favilla Lobo, pela oportunidade de uso do computador digital IBM-1130, sem o qual a realização dos cálculos numéricos teria sido impraticável. À Coordenação do Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo auxílio financeiro. À Srta. Suely Paez e ao Sr. Augusto Barbosa pelo cuidadoso trabalho de datilografia.

ÍNDICE

DEDICATÓRIA	ii.
HOMENAGENS	iii.
ÍNDICE	iv.
LISTA DE FIGURAS	v.
SUMÁRIO	vi.
Capítulos:	
I. INTRODUÇÃO	1.
II. ANÁLISE DO PROBLEMA	3.
1. O balanço de energia na parede	3.
2. As equações de conservação e similaridade local	8.
3. O método de solução	12.
3.1. Caso geral	12.
3.2. Caso estudado; simplificações	15.
III. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	22.
REFERÊNCIAS	32.
APÊNDICES	33.
A - Valores de $(d\theta / d\eta)_w$ e $(d\phi / d\eta)_w$ respectivamente para $Pr = 0,7$ e $Sc = 0,55$	33.
B - Tabelas de valores numéricos relativos às distribuições de temperatura na parede	34.
NOMENCLATURA	59.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 : Diagrama do sistema físico	3.
Figura 2 : Distribuição de temperaturas na parede, $(e / \epsilon \sigma T_{\infty}^4) = 1,6$...	27.
Figura 3 : Distribuição de temperaturas na parede, $(e / \epsilon \sigma T_{\infty}^4) = 1,2$...	28.
Figura 4 : Distribuição de temperaturas na parede, $(e / \epsilon \sigma T_{\infty}^4) = 0,8$...	29.
Figura 5 : Distribuição de temperaturas na parede, $(e / \epsilon \sigma T_{\infty}^4) = 0,4$...	30.
Figura 6 : Distribuição de temperaturas na parede, $(e / \epsilon \sigma T_{\infty}^4) = 0,0$...	31.

SUMÁRIO

Consideração é dada à troca simultânea de calor e massa em uma camada laminar sobre uma placa plana. A transferência de calor inclui trocas convectivas e radiativas com o ambiente. A transferência de massa resulta de sublimação na superfície da placa. Uma fonte (ou sumidouro) de calor dentro da placa é também levada em consideração. A distribuição longitudinal de temperaturas ao longo da superfície da placa é a maior incógnita do problema.

O problema agora descrito não pode ser resolvido por métodos convencionais de similaridade da camada limite. O conceito de similaridade local foi empregado na obtenção de soluções. Resultados numéricos foram obtidos para o caso em que a placa consiste de gelo e o fluido da corrente livre é ar. Distribuições de temperatura da superfície são apresentadas para uma faixa de temperaturas da corrente livre e de um parâmetro que caracteriza a intensidade da radiação absorvida é de uma fonte interna de calor. É encontrado, dependendo do valor deste último parâmetro, que a temperatura da placa pode aumentar ou diminuir com valores crescentes da distância, segundo o sentido da corrente livre, a partir da origem da placa. De um modo geral, os resultados desta investigação indicam que radiação tem um papel decisivo na determinação da distribuição de temperatura na superfície da placa.

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Para corpos movimentando-se em determinadas condições, torna-se importante evitar que a temperatura, em qualquer de seus pontos, ultrapasse um valor crítico, além do qual suas propriedades seriam afetadas. Dentre os diferentes processos que poderiam, então, ser utilizados, destaca-se o resfriamento por transferência de massa. É estudado, neste trabalho, o método em que o calor é impedido de atingir o corpo por meio da sublimação de um material que reveste a superfície a ser protegida.

Considera-se uma placa plana com uma superfície sublimável e escoamento laminar na camada limite, trocando calor com o ambiente por radiação e convecção. A radiação térmica emitida pela superfície torna, evidentemente, não linear o problema, impossibilitando a sua resolução por métodos convencionais de similaridade da camada limite. Além disto, pode ser mostrado que fatores lineares, tais como a radiação absorvida e fontes (ou sumidouros) de calor dentro do corpo, levam a conclusões análogas. O caminho adotado foi, então, o uso de similaridade local, levando em conta a variação de temperatura da superfície ao longo da corrente livre. Isto é, é suposto que a similaridade se aplica em cada ponto, isoladamente.

O fato novo nesta investigação é a inclusão de radiação incidente e emitida. Na ausência destes processos de transferência de energia, o problema é solúvel com o emprego do método descrito na referência 1. O efeito da manutenção ou supressão da radiação da superfície foi especificamente investiga

do.

Para fins de cálculo numérico, gelo (água) foi escolhido como o material sublimável e ar como o gás da corrente livre.

CAPÍTULO II

ANÁLISE DO PROBLEMA

1. O balanço de energia na parede.

O modelo físico adotado é uma placa plana cuja superfície é constituída de um material sublimável (Figura 1). Em direção paralela à superfície da placa escoa um gás com velocidade uniforme U_{∞} . A pressão estática é p_{∞} , enquanto a temperatura da corrente livre é T_{∞} e a concentração, na mesma, do vapor correspondente ao material da parede é dada pela fração mássica W_{∞} .

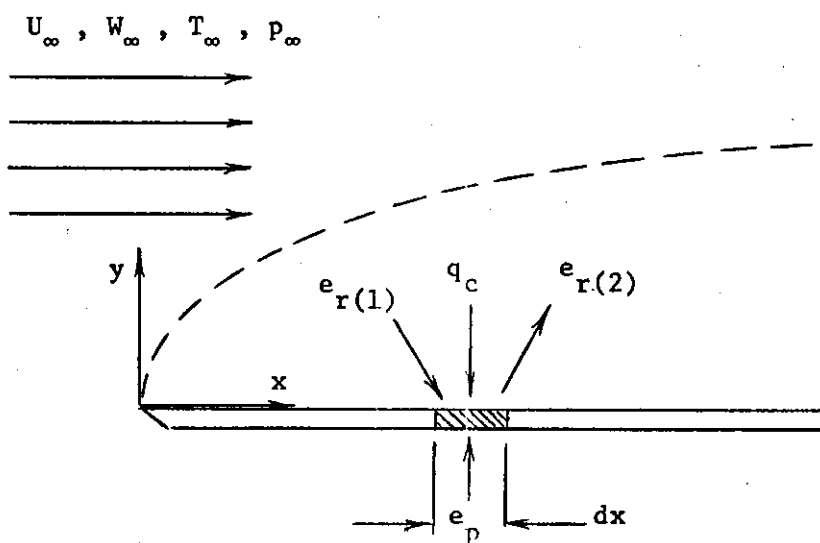


Fig. 1 - Diagrama do sistema físico

A placa recebe radiação do ambiente e, por sua vez, irradia para o ambiente. Há, também, uma transferência de calor por convecção da (ou para a) superfície para o (ou do) gás que escoia. No caso a ser aqui considerado, W_{∞} será inferior à fração mássica de equilíbrio correspondente à temperatura local

da parede e sublimação, portanto, normalmente ocorrerá. Tendo em vista generalizar o problema, será considerado que há um fluxo de energia que deve ser transferido da superfície da placa para o gás e o ambiente (por exemplo, fonte ou sumidouro de calor, internos).

O ponto inicial da análise é um balanço de energia em um dado local da placa (Figura 1)

$$q_s = q_c + e_{r(1)} + e_p - e_{r(2)} \quad (1)$$

onde q_s é um sumidouro de calor, na superfície, devido à sublimação; q_c é o calor transferido do meio ambiente para a placa, por convecção; $e_{r(1)}$ é a energia radiante térmica absorvida pela placa; $e_{r(2)}$ é a energia radiante térmica emitida pela placa; e e_p é a energia cedida (ou retirada) à placa por uma fonte (ou sumidouro) de calor. Todas as quantidades de energia acima são dadas por unidade de tempo e área.

Cada um dos termos em (1) podem ser abertos da forma que se segue. Inicialmente, seja o termo da sublimação. A quantidade q_s é reescrita como $\dot{m}h_s$, onde \dot{m} é a taxa local de sublimação e h_s é o calor latente de sublimação. Por sua vez, \dot{m} pode ser expresso em termos da densidade local ρ da mistura e da velocidade convectiva v_w na parede, isto é, $\dot{m} = \rho v_w$ (ref. 1). Assim, q_s fica

$$q_s = \rho v_w h_s \quad (2)$$

A seguir, considerando a representação matemática do calor transferido por convecção, deve ser observado o fato de ser a temperatura da superfície uma função da posição. Por enquanto, q_c será expresso por

$$q_c = h^* (T_\infty - T_w) \quad (3)$$

onde h^* é um coeficiente local de transferência de calor o qual, em princípio, deve levar em conta a variação de T_w . A avaliação de h^* será discutida, em detalhes, mais tarde. T_w e T_∞ são as temperaturas absolutas da parede e da corrente livre, respectivamente.

A radiação emitida pela placa será dada por

$$q_{r(2)} = \epsilon \sigma T_w^4 \quad (4)$$

onde ϵ é o "emittance" total hemisférico. Considere-se a radiação absorvida pela placa $e_{r(1)}$ como uniforme ao longo de seu comprimento, análogamente à fonte (ou sumidouro) e_p , e seja

$$e_{r(1)} + e_p = e \quad (5)$$

Então, após substituição de (2), (3), (4) e (5) em (1) e rearranjo dos termos, vem

$$\frac{T_w}{T_\infty} = \left\{ K - \left(\frac{T_w}{T_\infty} \right)^4 \right\} \frac{h_r}{h^*} + 1 - \rho \frac{v_w}{T_\infty} \frac{h_s}{h^*} \quad (6)$$

onde

$$K = \frac{e}{\epsilon \sigma T_\infty^4}, \quad h_r = \epsilon \sigma T_\infty^3 \quad (7)$$

É conveniente colocar (6) em função de quantidades adimensionais, como

$$Pr = \frac{\mu c_p}{k}, \quad Nu_x = \frac{h^* x}{k}, \quad f_w = -2 \frac{v_w}{U_\infty} \sqrt{Re_x} \quad (8)$$

Além disto, fazendo

$$\chi = \left(\frac{h_r}{h^*} \right)^2 = \left(\frac{\epsilon \sigma T_\infty^3}{Nu_x / \sqrt{Re_x}} \frac{x}{k} \frac{1}{\sqrt{Re_x}} \right)^2 \quad (9)$$

vem

$$\frac{T_w}{T_\infty} = \left\{ K - \left(\frac{T_w}{T_\infty} \right)^4 \right\}^{1/2} + 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{h_s}{c_p T_\infty} \right) \frac{Pr}{Nu_x / \sqrt{Re_x}} \quad (10)$$

Nesta equação, a influência das radiações absorvida e emitida está concentrada nos termos $K \chi^{1/2}$ e $(T_w / T_\infty)^4 \chi^{1/2}$, respectivamente. Convecção é representada por (T_w / T_∞) e a unidade. O termo restante leva em conta a sublimação.

A equação (10) tem como incógnitas T_w e f_w , uma vez fixados o material da placa, as condições ambiente e a localização x (*). Torna-se, portanto, necessário o uso de outra relação. Impõe-se, então, a condição de ser a superfície impermeável ao gás ambiente. Denotando por g o gás da corrente livre, a condição de impermeabilidade é expressa por

$$v_g = 0 \quad \text{em} \quad y = 0 \quad (11)$$

Em uma mistura binária, a velocidade de um dos componentes é a soma das velocidades convectiva (v_c) e difusiva. Assim, tendo em vista que a velocidade difusiva é dada por $-(D / W_g) (\partial W_g / \partial y)$ (para o fluido ambiente), vem

$$v_g = - \frac{D}{W_g} \frac{\partial W_g}{\partial y} + v_c \quad (12)$$

Nesta expressão D é o coeficiente de difusão binário. Aplicando (11), e levando em conta que $W + W_g = 1$ resulta, na parede

$$v_w = - \frac{D}{1 - W_w} \left(\frac{\partial W_g}{\partial y} \right)_w \quad (13)$$

(*) Esta afirmação é válida desde que o valor de $Nu_x / \sqrt{Re_x}$ possa ser localmente avaliado, tal avaliação sendo deixada de lado até mais tarde.

onde a variável W representa a fração mássica do gás sublimado e o índice w a parede. Devido à última equação de (8), pode-se escrever

$$1 - W_w = \frac{2 D \left(\partial W / \partial y \right)_w \sqrt{Re_x}}{U_\infty f_w} \quad (14)$$

Definindo, finalmente, as variáveis

$$\phi = \frac{W - W_\infty}{W_w - W_\infty}, \quad \eta = \frac{y}{x} \sqrt{Re_x} \quad (15)$$

vem, de (14)

$$\frac{1 - W_w}{W_w - W_\infty} = \frac{2 \left(\partial \phi / \partial \eta \right)_w}{Sc f_w} \quad (16)$$

Pode ser observado que ϕ é um parâmetro de fração mássica, ao passo que η é prontamente identificável como a variável de similaridade de Blasius.

Embora a equação (16) contenha f_w como desejado, contém também W_w , a qual à primeira vista, parece ser uma incógnita adicional. A quantidade $\left(\partial \phi / \partial \eta \right)_w$ tem um papel semelhante ao de $Nu_x / \sqrt{Re_x}$ na equação (10), e será discutida mais tarde. Por ora, é apropriado mostrar que W_w é, de fato, relacionado biunivocamente com T_w .

Com este propósito, considere-se os dados do estado de saturação para o material sublimável, normalmente dados como pressão de vapor p_v em função da temperatura. Quando a pressão total p (soma das pressões parciais) do sistema é especificada e os pesos moleculares dos gases participantes conhecidos, pode ser demonstrado que

$$W = \frac{p_v / p}{\left(M_g / M \right) + \left(p_v / p \right) \left\{ 1 - \left(M_g / M \right) \right\}} \quad (17)$$

onde M é a massa molecular do material sublimado e M_g do gás da corrente livre.

Na equação (17) foi suposto que a mistura e os gases componentes obedecem à lei dos gases perfeitos. Quando a equação (17) é usada juntamente com os dados do estado de saturação, W_w pode ser tomado como uma função de T_w .

Uma tabela de W_w versus T_w e as equações (10) e (16) apresentam, como incógnitas, T_w , W_w e f_w . No entanto, a solução do problema requer os valores locais de $Nu_x / \sqrt{Re_x}$ e $(\partial \phi / \partial \eta)_w$. As quantidades precedentes dependem, respectivamente, da dependência com x da temperatura da parede e da fração mássica, as quais não são conhecidas a priori.

É sabido que o escoamento laminar tem "boa memória" quanto à situação reinante a montante. Para diferentes casos, o valor do coeficiente local de transferência de calor h (e, portanto, de $Nu_x / \sqrt{Re_x}$) já foi estudado. Soluções exatas, por similaridade, podem ser obtidas para variação de temperatura, na parede, da forma $T_w - T_\infty = \sum a_n x^n$ (referências 2 e 3) e fluxo de calor, na parede, da forma $q = \sum b_n x^n$ (referência 4), onde a_n , b_n e n são números reais quaisquer. O presente problema não se enquadra a priori, em nenhum dos citados. Assim sendo, algum outro caminho deve ser achado para a avaliação de $Nu_x / \sqrt{Re_x}$; análogamente para $(\partial \phi / \partial \eta)_w$. Com este fim, é proveitoso examinar as equações de conservação.

2. As equações de conservação e similaridade local.

Para o caso de escoamento laminar na camada limite, regime permanente a duas dimensões, considerando-se dissipação viscosa desprezível e propriedades constantes, as equações diferenciais da continuidade, quantidade de movimento, energia e difusão podem ser escritas da forma

Continuidade

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (18)$$

Quantidade de movimento

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (19)$$

Energia

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (20)$$

Difusão

$$u \frac{\partial W}{\partial x} + v \frac{\partial W}{\partial y} = D \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \quad (21)$$

cujas condições de contorno são

$$y = 0 \quad \left\{ \begin{array}{l} u = 0 \\ v = v_w \\ T = T_w \\ W = W_w \end{array} \right. \quad y \rightarrow \infty \quad \left\{ \begin{array}{l} u \rightarrow U_\infty \\ T \rightarrow T_\infty \\ W \rightarrow W_\infty \end{array} \right. \quad (22)$$

Como mencionado anteriormente, as condições de contorno T_w e W_w não são independentes, estando relacionadas pela expressão (17). Há, também, uma ligação entre W_w e v_w por meio da equação (16).

Para a resolução de (19), (20) e (21), satisfazendo (18), convém definir a função ψ ("stream function")

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial y}, \quad v = - \frac{\partial \psi}{\partial x}, \quad (23)$$

as variáveis independentes

$$\eta = \frac{y}{x} \text{Re}_x^{1/2}, \quad \xi = A x^p, \quad (24)$$

e as variáveis dependentes

$$\begin{aligned} f(\xi, \eta) &= \frac{\psi}{\sqrt{\nu U_{\infty} x}} \\ \theta(\xi, \eta) &= \frac{T - T_{\infty}}{T_w - T_{\infty}} \\ \phi(\xi, \eta) &= \frac{W - W_{\infty}}{W_w - W_{\infty}} \end{aligned} \quad (25)$$

onde A e p são constantes reais. De (23), (24) e (25) obtêm-se os componentes da velocidade

$$\begin{aligned} u &= U_{\infty} \frac{\partial f}{\partial \eta} \\ v &= -\sqrt{(\nu U_{\infty} / x)} \left\{ \frac{1}{2} f + p \xi \frac{\partial f}{\partial \xi} - \frac{\eta}{2} \frac{\partial f}{\partial \eta} \right\} \end{aligned} \quad (26)$$

Introduzindo as novas variáveis, as equações de continuidade(19)

a (21) tornam-se

Quantidade de movimento

$$\frac{\partial^3 f}{\partial \eta^3} + \frac{1}{2} f \frac{\partial^2 f}{\partial \eta^2} = p \xi \left\{ \frac{\partial f}{\partial \eta} \frac{\partial^2 f}{\partial \eta \partial \xi} - \frac{\partial f}{\partial \xi} \frac{\partial^2 f}{\partial \eta^2} \right\} \quad (27)$$

Energia

$$\frac{1}{Pr} \frac{\partial^2 \theta}{\partial \eta^2} + \frac{1}{2} f \frac{\partial \theta}{\partial \eta} - n_T \theta \frac{\partial f}{\partial \eta} = p \xi \left\{ \frac{\partial f}{\partial \eta} \frac{\partial \theta}{\partial \xi} - \frac{\partial f}{\partial \xi} \frac{\partial \theta}{\partial \eta} \right\} \quad (28)$$

Difusão

$$\frac{1}{Sc} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \eta^2} + \frac{1}{2} f \frac{\partial \phi}{\partial \eta} - n_w \phi \frac{\partial f}{\partial \eta} = p \xi \left\{ \frac{\partial f}{\partial \eta} \frac{\partial \phi}{\partial \xi} - \frac{\partial f}{\partial \xi} \frac{\partial \phi}{\partial \eta} \right\} \quad (29)$$

onde

$$n_T = \frac{x \left(\frac{dT_w}{dx} \right)}{T_w - T_\infty}, \quad n_W = \frac{x \left(\frac{dW_w}{dx} \right)}{W_w - W_\infty} \quad (30)$$

Para que similaridade seja aplicada ao longo da placa é necessário que as derivadas em relação a x e ξ sejam nulas, isto é, que f , θ e ϕ sejam função somente de η . Seriam obtidas, então, as equações usadas por Hartnett e Eckert (ref. 1). No presente caso, é proposto o emprêgo do conceito de similaridade local, tal que as derivadas $\partial/\partial\xi$ que aparecem nas equações transformadas de continuidade são desprezadas. Assim, as equações resultantes são aplicáveis localmente, em específicos valores de x (usando valores locais de n_T e n_W).

Se os termos que envolvem $\partial/\partial\xi$ são eliminados, as equações resultantes são idênticas às obtidas para condições de similaridade com $T_w - T_\infty = A x^{n_T}$ e $W_w - W_\infty = B x^{n_W}$. Para fins de aplicação local, as derivadas parciais em relação a η são escritas como derivadas totais. Assim

$$\frac{d^3 f}{d\eta^3} + \frac{1}{2} f \frac{d^2 f}{d\eta^2} = 0 \quad (31)$$

$$\frac{1}{Pr} \frac{d^2 \theta}{d\eta^2} + \frac{1}{2} f \frac{d\theta}{d\eta} = n_T \theta \frac{df}{d\eta} \quad (32)$$

$$\frac{1}{Sc} \frac{d^2 \phi}{d\eta^2} + \frac{1}{2} f \frac{d\phi}{d\eta} = n_W \phi \frac{df}{d\eta} \quad (33)$$

As condições de contorno correspondentes às novas equações são

$$\eta = 0 \quad \left| \quad \begin{aligned} f &= f_w = -2 \frac{v_w}{U_\infty} \sqrt{Re_x}, \quad \theta = 1 \\ \frac{df}{d\eta} &= 0, \quad \phi = 1 \end{aligned} \right. \quad (34a)$$

$$\eta \rightarrow \infty \quad \left| \quad \begin{array}{l} \frac{df}{d\eta} \rightarrow 1 \\ \theta \rightarrow 0 \\ \phi \rightarrow 0 \end{array} \right. \quad (34b)$$

onde, em geral, f_w é uma função da posição ao longo da placa.

Das equações (31) a (33) podem ser obtidos $(d\phi/d\eta)_w$ e, também, $Nu_x / \sqrt{Re_x}$, pois

$$\frac{Nu_x}{\sqrt{Re_x}} = - \left(\frac{d\theta}{d\eta} \right)_w \quad (35)$$

Isto porque o calor perdido por convecção por uma placa plana q em um determinado ponto, por unidade de tempo e área é dado por $q = -k \left(\partial T / \partial y \right)_w$, onde k é a condutividade térmica do material da parede. A substituição, nesta expressão, das variáveis θ e η (definidas em (25) e (24)), resulta na relação (35). Os valores $(d\phi/d\eta)_w$ e $Nu_x / \sqrt{Re_x}$, é mais f_w , são os resultados necessários para a avaliação de (10) e (16), satisfazendo W_w versus T_w . A solução de (31) a (33) é simples em um computador digital. Os valores específicos dos parâmetros n_T , n_w e f_w , e os correspondentes $(d\phi/d\eta)_w$ e $Nu_x / \sqrt{Re_x}$ serão discutidos / mais tarde.

3. O método de solução.

3.1. Caso geral.

Como visto na seção precedente, para a solução do problema proposto torna-se necessário o conhecimento prévio de $(d\phi/d\eta)_w$ e $Nu_x / \sqrt{Re_x}$. Estes valores podem ser obtidos do sistema de equações (31) a (33). Ocorre que a solução da velocidade (equação 31) depende de f_w ; a solução de θ (equação 32) de

pende de Pr , f_w e n_T ; a solução de ϕ (equação 33) depende de Sc , f_w e n_W . Mas Pr e Sc são fixados pelos gases sublimado e da corrente livre. Restam os parâmetros f_w , n_T e n_W que não são conhecidos antecipadamente, para qualquer ponto da placa. Este obstáculo pode ser contornado pelo uso de um processo iterativo, conforme detalhado a seguir.

Inicialmente, escolhe-se quaisquer valores para f_w , n_T e n_W . Os citados parâmetros podem ser considerados, por exemplo, iguais a zero. Observe-se, das equações (30), que o caso $n_T = n_W = 0$ corresponde à situação em que, localmente, não há variação de temperatura e concentração ao longo da placa. / Com estes valores arbitrados, é imediata a avaliação de $(d\phi/d\eta)_w$ e $Nu_x / \sqrt{Re_x}$, por intermédio da solução das equações (31) a (33).

O passo seguinte é a determinação de T_w . Para tal, f_w é eliminado de (10) e (16), resultando

$$\frac{T_w}{T_\infty} = \left\{ K - \left(\frac{T_w}{T_\infty} \right)^4 \right\} x^{1/2} + 1 + \left(\frac{h_s}{c_p T_\infty} \right) \frac{Pr}{Sc} \frac{(d\phi/d\eta)_w}{Nu_x / \sqrt{Re_x}} \left(\frac{W_w - W_\infty}{1 - W_w} \right) \quad (36)$$

Esta equação tem, como incógnitas, apenas T_w e W_w , uma vez fixado o local x . Mas como discutido anteriormente, T_w e W_w são relacionados biunivocamente, para um dado valor da pressão total p . Assim sendo, resolve-se (36), obtendo-se T_w . Este resultado, no entanto, originou-se de valores arbitrados de f_w , n_T e n_W .

Os valores n_T e n_W são conferidos efetuando-se o cálculo acima mencionado para quatro pontos próximos do local x escolhido, sendo dois à direita e dois à esquerda do mesmo. Curvas polinomiais $T_w = T_w(x)$ e $W_w = W_w(x)$ são, então, ajustadas por mínimos quadráticos e diferenciadas, de modo a se achar dT_w/dx e dW_w/dx no ponto central. Tendo em vista que

$$\frac{x (dT_w/dx)}{T_w - T_\infty} = \frac{x (dT_w/dx)}{T_w - T_\infty}, \quad \frac{x (dW_w/dx)}{W_w - W_\infty} = \frac{x (dW_w/dx)}{W_w - W_\infty} \quad (37)$$

novos valores de n_T e n_W são avaliados. A verificação de f_w é feita com o auxílio de (16). Nesta expressão são conhecidos W_w (a partir do valor de T_w recém calculado), Sc e W_∞ , além do valor aproximado de $(d\phi/dn)_w$. Portanto, um novo f_w é encontrado.

Para a continuação do método iterativo, os valores recalculados de f_w , n_T e n_W são usados a fim de providenciar $(d\phi/dn)_w$ e $Nu_x / \sqrt{Re_x}$. O circuito descrito acima é repetido tantas vezes quanto for necessário até que o critério adotado para sua interrupção seja satisfeito. No presente trabalho foi determinado que a interrupção dar-se-ia quando a variação de $Nu_x / \sqrt{Re_x}$, calculado para o mesmo ponto, em duas iterações sucessivas, não fôsse superior a 0,0005. A escolha de $Nu_x / \sqrt{Re_x}$ como parâmetro de comparação é explicada abaixo.

O resultado que se procura é a distribuição de temperaturas ao longo da parede, ou seja, $T_w = T_w(x)$. Acontece que, pelo método de solução adotado, obtêm-se valores de T_w correspondentes à abscissa adimensional x a qual, conforme (9), é função do valor local de $Nu_x / \sqrt{Re_x}$, sendo os demais termos conhecidos. Logo, uma vez limitado o erro em $Nu_x / \sqrt{Re_x}$, é garantido um valor bastante acurado para x relacionado com a temperatura T_w achada. Consequentemente, $T_w = T_w(x)$ convergirá para o resultado correto, consistente com o modelo físico adotado e a precisão considerada como razoável para os diversos parâmetros.

Para a execução do trabalho de computação de uma forma eficiente, é apropriado determinar os valores de $(d\phi/dn)_w$ e $Nu_x / \sqrt{Re_x}$ antecipadamente. Para atingir este objetivo, fixa-se diferentes valores de f_w , resolvendo-se as equações (31) a (33) para vários valores de n_T e n_W . Como resultado, são obtidos relações de $(d\phi/dn)_w$ e $Nu_x / \sqrt{Re_x}$ em função de n_W e n_T , res

pectivamente, para valores paramétricos de f_w . Representações por mínimos quadrados podem ser ajustadas para as distribuições $Nu_x / \sqrt{Re_x}$ versus n_T e $(d\phi/dn)_w$ versus n_W , para cada f_w . Dêste modo, para dados n_T e n_W , por interpoção de acôrdo com o valor de f_w , encontra-se prontamente os correspondentes $Nu_x / \sqrt{Re_x}$ e $(d\phi/dn)_w$.

3.2. Caso estudado; simplificações.

Para a solução do presente problema, devem ser especificados o material da parede e as condições ambiente. De tal especificação podem ser obtidos os diversos parâmetros que entram como constantes nas várias equações, ou seja, K , T_∞ , W_∞ , c_p , Pr , Sc e p , além da relação entre temperatura e pressão de vapor para o gás sublimado. No caso aqui estudado foi escolhido ar isento de umidade como gás da corrente livre e gelo como o material sublimável. A pressão ambiente p foi fixada em uma atmosfera, enquanto T_∞ e K foram deixados como parâmetros a serem variados durante o curso da investigação. Assim, com respeito às equações (10) e (16), os seguintes valores são apropriados

$$\begin{aligned} Pr &= 0,7 \quad , \quad c_p = 0,238 \text{ BTU} / \text{lb}^0\text{F} \quad , \quad W_\infty = 0 \\ Sc &= 0,55 \quad , \quad h_s = 1220 \text{ BTU} / \text{lb} \end{aligned} \quad (38)$$

A relação entre T_w e W_w para o vapor d'água, obtida da equação (17) *, com o auxílio da referência (5), é dada na tabela 1.

Para fins de computação, W_w e T_w foram relacionados algêbricamente por meio de cinco expressões polinomiais, válidas em igual número de intervalos

(*) $M = 18,016 \quad , \quad M_g = 28,967$

TABELA 1

Relação entre T e W para o sistema ar-gêlo, a 1 atmosfera, no estado de saturação

T ($^{\circ}$ F)	p_v (psi)	W
32	0,0885	0,0037539530
30	0,0808	0,0034266576
25	0,0640	0,0027130093
20	0,0505	0,0021399895
15	0,0396	0,0016776197
10	0,0309	0,0013087585
5	0,0240	0,0010163309
0	0,0185	0,0007833109
- 5	0,0142	0,0006011775
-10	0,0108	0,0004571935
-15	0,0082	0,0003471052
-20	0,0062	0,0002624319
-25	0,0046	0,0001946995
-30	0,0035	0,0001481367
-35	0,0025	0,0001058092
-40	0,0019	0,0000804137

los de temperatura. Assim

$$W = A + B.T + C.T^2 + D.T^3 + E.T^4 \quad (39)$$

onde T é dado em $^{\circ}\text{F}$ e as constantes A, B, C, D e E são função do intervalo de temperatura considerado, ou seja,

$$17,5 \text{ } ^{\circ}\text{F} \leq T_w < 32,0 \text{ } ^{\circ}\text{F} \quad , A = 0,3183296050 \times 10^{-3}, B = 0,1258720697 \times 10^{-3}, \\ C = -0,4630506426 \times 10^{-5} \quad , D = 0,1744272424 \times 10^{-6}, E = -0,1493718151 \times 10^{-8}, \quad (39a)$$

$$2,5 \text{ } ^{\circ}\text{F} \leq T_w < 17,5 \text{ } ^{\circ}\text{F} \quad , A = 0,7833108766 \times 10^{-3}, B = 0,4179606600 \times 10^{-4}, \\ C = 0,8484775431 \times 10^{-6} \quad , D = 0,2260755944 \times 10^{-7}, E = 0,3161334867 \times 10^{-11}, \quad (39b)$$

$$-15,0 \text{ } ^{\circ}\text{F} \leq T_w < 2,5 \text{ } ^{\circ}\text{F} \quad , A = 0,7833108948 \times 10^{-3}, B = 0,4094937659 \times 10^{-4}, \\ C = 0,1003595460 \times 10^{-5} \quad , D = 0,2263875527 \times 10^{-7}, E = 0,5655669760 \times 10^{-9}, \quad (39c)$$

$$-30,0 \text{ } ^{\circ}\text{F} < T_w < -15,0 \text{ } ^{\circ}\text{F} \quad , A = 0,8504233844 \times 10^{-3}, B = 0,5823029579 \times 10^{-4}, \\ C = 0,2508279544 \times 10^{-5} \quad , D = 0,7017462691 \times 10^{-7}, E = 0,8418330726 \times 10^{-9}, \quad (39d)$$

$$-40,0 \text{ } ^{\circ}\text{F} < T_w \leq -30,0 \text{ } ^{\circ}\text{F} \quad , A = 0,7576717066 \times 10^{-3}, B = 0,3047698368 \times 10^{-4}, \\ C = 0,3386383826 \times 10^{-6} \quad , D = 0,0 \quad , E = 0,0 \quad (39e)$$

Numa simplificação importante ocorreu como consequência da expressão (16). Desta pode-se tirar

$$f_w = \frac{2}{Sc} \frac{W_w - W_{\infty}}{1 - W_w} \left(\frac{d\phi}{d\eta} \right)_w \quad (16a)$$

Mas $W_{\infty} = 0$ e W_w máximo nas condições dadas é 0,003753953. Como $Sc = 0,55$, $W_w = 0,003753953$ e com $(d\phi/d\eta)_w$ em valor absoluto da ordem de 0,4 (que é essencialmente o máximo encontrado), vem que f_w não ultrapassa 0,0055 em módulo. Assim, para fins de determinação de $(d\phi/d\eta)_w$ e $Nu_x / \sqrt{Re_x}$ o parâmetro f_w pode ser considerado igual a zero, pois sua pequena faixa de variação prática -

praticamente não influi nos referidos valores.

Além disto, devido ao fato de que $W_w \ll 1$ e $W_\infty = 0$, a equação (36) é ligeiramente simplificada para

$$\frac{T_w}{T_\infty} = \left\{ K - \left(\frac{T_w}{T_\infty} \right)^4 \right\} \chi^{1/2} + 1 + \left(\frac{h_s}{c_p T_\infty} \right) \frac{Pr}{Sc} \frac{(d\phi/d\eta)_w}{Nu_x / \sqrt{Re_x}} W_w \quad (36a)$$

De modo a facilitar sua solução, (36a) é reescrita da forma

$$W_w = \left\{ \frac{T_w}{T_\infty} - 1 - \left[K - \left(\frac{T_w}{T_\infty} \right)^4 \right] \chi^{1/2} \right\} \left(\frac{c_p T_\infty}{h_s} \right) \frac{Sc}{Pr} \frac{Nu_x / \sqrt{Re_x}}{(d\phi/d\eta)_w} \quad (36b)$$

Esta equação relaciona W_w e T_w , uma vez indicados T_∞ , K e a localização χ . Mas W_w e T_w devem satisfazer também (39). A determinação destes valores foi feita definindo-se uma função $Z = Z(T_w)$, tal que

$$Z = W_w (\text{eq. 39}) - W_w (\text{eq. 36b}) \quad (40)$$

e pesquisando-se, pelo método de Muller (ref. 6), a raiz T_w compreendida no intervalo $(-40^\circ\text{F}, 32^\circ\text{F})$. Uma vez achado T_w , a avaliação de W_w é imediata da equação (39).

A escolha de -40°F como limite inferior deveu-se ao fato de ser esta a menor temperatura para a qual a referência (5) fornece dados. A cota superior (32°F) teve como motivo restringir o estudo à região de sublimação, pois àquela temperatura a parede se fundiria.

É interessante observar que só é possível ocorrer sublimação a partir da abscissa $x = 0$ quando, neste local, $T_w < 32^\circ\text{F}$. Da equação (36b) conclui-se que, para $x \approx 0$, radiação pode ser desprezada em presença da troca de calor por convecção. Fazendo em (36b) $x = 0$, $W_w = 0,0037539530$ (correspondente a $T_w = 32^\circ\text{F}$ e pressão total de uma atmosfera), $Nu_x / \sqrt{Re_x} = 0,29268$ (pois,

da equação (30), $n_T = 0$ e $(d\phi/dn)_w = -0,26841$ (pois, da equação (30), $n_W = 0$), e levando em conta os valores especificados em (38), obtém-se $T_\infty \approx 54,5^\circ\text{F}$. Este é, portanto, o valor máximo que T_∞ pode apresentar, sem que haja fusão na origem da placa, nas condições aqui consideradas.

Um outro ponto a ser discutido refere-se às limitações do modelo de similaridade local. Os parâmetros n_T e n_W foram definidos como

$$n_T = \frac{x (dT_w / dx)}{T_w - T_\infty}, \quad n_W = \frac{x (dW_w / dx)}{W_w - W_\infty} \quad (30)$$

sejam δ_T e δ_W , respectivamente, as espessuras das camadas limite térmica e de difusão. Então, de (30), pode-se escrever

$$n_T = \frac{x}{\delta_T} \frac{dT_w / dx}{(T_w - T_\infty) / \delta_T}, \quad n_W = \frac{x}{\delta_W} \frac{dW_w / dx}{(W_w - W_\infty) / \delta_W} \quad (30a)$$

Em (30a) observa-se que, localmente, dT_w / dx (ou dW_w / dx) mostra como varia T_w (ou W_w) ao longo da placa plana ao passo que $(T_w - T_\infty) / \delta_T$ (ou $(W_w - W_\infty) / \delta_W$) indica a variação de T_w (ou W_w) através da camada limite. Tendo em vista que $(\delta_T / x) \approx (\delta_W / x) \approx (5 / \sqrt{\text{Re}_x})$ vem, para $\text{Re}_x = 10\,000$, $(x / \delta_T) \approx (x / \delta_W) \approx 20$.

O método de similaridade local é baseado na hipótese de que variações ao longo da parede são muito menores que as variações através da camada limite. Portanto, a razão de dT_w / dx para $(T_w - T_\infty) / \delta_T$ (ou dW_w / dx para $(W_w - W_\infty) / \delta_W$) deve ser muito menor que a unidade. Assim, fixando em 0,1 o limite da referida relação, encontra-se $|n_{T(\max)}| \approx |n_{W(\max)}| \approx 2,0$. Devido à natureza de ordem de grandeza de derivação precedente, foi julgado razoável tomar como cota superior aproximadamente 1,0.

Consideração especial deve ser dada para valores negativos de n_T

e n_W . Em particular quando $n_T = n_W = -0,5$, $Nu_x / \sqrt{Re_x} = (d\phi / dn)_w = 0$. Além disto, quando n_T e $n_W < -0,5$, $Nu_x / \sqrt{Re_x}$ e $(d\phi / dn)_w$ são negativos. Em outras palavras, a direção de transferência é contrária à força propulsora global entre a parede e a corrente livre. Este comportamento é produzido / por efeitos de montante que se propagam ao ponto de interesse. Da mesma forma / que o modelo de similaridade local exclui fortes ligações ao longo da corrente livre, foi decidido- excluir casos em que n_T e n_W são inferiores a $-0,5$. Con- vêm frisar que o método de solução para a equação (36b) falha quando $n_T < -0,5$ e pode também falhar quando $n_W < -0,5$.

Agora, reconsiderando a equação (9), é visto que enquanto x é um parâmetro computacional conveniente, isto não se verifica quanto à sua adoção / como parâmetro para apresentação de resultados. O motivo é que contém, simul- taneamente, x e $Nu_x / \sqrt{Re_x}$, sendo que a relação que liga $Nu_x / \sqrt{Re_x}$ a x não é conhecida a priori. Com o fim de evitar tal problema, é interessante a ob- servação da equação (9) na forma

$$\left(Nu_x / \sqrt{Re_x} \right)^2 x = \left(\frac{\epsilon \sigma T_\infty^3}{k} \frac{x}{\sqrt{Re_x}} \right)^2 \quad (9b)$$

O segundo membro de (9b) envolve apenas elementos constantes, além de x que é prescrito independentemente. Ocorre, porém, que o mesmo é linearmente proporcio- nal a x . É conveniente, assim, a introdução de uma nova variável

$$\Omega = \left(\frac{\epsilon \sigma T_\infty^3}{k} \frac{x}{\sqrt{Re_x}} \right)^2 \quad (41)$$

ou seja

$$\Omega = \left(Nu_x / \sqrt{Re_x} \right)^2 x \quad (42)$$

Da relação linear entre Ω e x conclui-se que é vantajosa a substituição de x

por Ω como variável independente. Por simples mudança de escala, isto é, por uma divisão de Ω por $(\epsilon \sigma T_\infty^3)^2 \nu / (U_\infty k^2)$, obtém-se a distribuição de temperatura em função da abscissa real x .

Com base na equação (9), um limite máximo para χ (para efeito de cálculo numérico) pode ser estabelecido. Para o sistema considerado (ar-gelo) tem-se, aproximadamente (ref. 7),

$$\begin{aligned} k &= 0,014 \text{ BTU} / \text{h ft}^0 \text{F} & \epsilon &= 1 \\ \nu &= 13 \times 10^{-5} \text{ ft}^2 / \text{seg} \end{aligned} \quad (43)$$

Além disto, $\sigma = 1,714 \times 10^{-9} \text{ BTU} / \text{h ft}^2 \text{ } ^0\text{R}^4$ e as temperaturas ambiente adotadas são da ordem de $500 \text{ } ^0\text{R}$. Tomando $Nu_x / \sqrt{Re_x}$ como 0,35 a equação (9) toma a forma

$$\chi = 0,2485 x / U_\infty \quad (9c)$$

Visando evitar que convecção natural possa ter influência em escoamentos muito lentos, convém fixar como limite mínimo para U_∞ o valor $2 \text{ ft} / \text{seg}$. Tomando x máximo igual a 1 ft encontra-se $\chi = 0,12$. As tabelas e gráficos anexos foram obtidos a partir de valores de χ até 0,25.

Como mencionado anteriormente, os pontos para os quais n_T e n_W encontram-se fora da faixa $-0,5 < n_T, n_W < \approx 1,0$ não foram considerados. Em consequência, curvas para determinados valores dos parâmetros do problema não puderam ser completamente estabelecidas, sendo interrompidas em alguns locais. Nos referidos trechos, o traçado foi completado por meio de arcos que se ajustassem suave e logicamente às curvas obtidas analiticamente.

CAPÍTULO III

APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A marcha de cálculo descrita no capítulo precedente foi executada para diferentes valores dos parâmetros K e T_{∞} . Os resultados assim obtidos são apresentados nas Figuras 2 a 6. Listagens numéricas detalhadas são providenciadas no Apêndice.

As figuras dão informação a respeito da variação de temperatura da superfície (em graus Fahrenheit) como função de posição ao longo da placa, a abscissa sendo diretamente proporcional à coordenada longitudinal x . Cada figura corresponde a um valor específico do parâmetro de radiação $K(= e / \epsilon \sigma T_{\infty}^4)$ - igual a 1,6 , 1,2 , 0,8 , 0,4 e 0 , respectivamente para as Figuras 2,3,4,5 e 6. Em cada figura são dadas curvas para temperaturas da corrente livre T_{∞} de 10, 0 , 10 e 20 $^{\circ}\text{F}$.

Para cada nível de temperatura da corrente livre, são mostradas três curvas. A linha contínua indica resultados obtidos quando, após inúmeras iterações, o critério de interrupção descrito na seção (II - 3.1) foi satisfeito. A linha tracejada mostra a distribuição de temperaturas encontrada considerando-se, para efeito de determinação de $Nu_x / \sqrt{Re_x}$ e $(d\phi / d\eta)_w$, parede isotérmica, ou seja, $n_T = n_W = 0$. A linha constituída de traços e pontos alternados é obtida usando-se como ordenada o valor da temperatura para o caso de $n_T = n_W = 0$ e computando-se Ω através da equação (42), levando-se em conta, no entanto, o valor corrigido de $Nu_x / \sqrt{Re_x}$ encontrado após a primeira iteração. As três modalidades de curva acima mencionadas são designadas por final ,

inicial e ajustado, respectivamente.

Nas Figuras 2 e 4 aparecem algumas curvas representativas de casos em que a radiação emitida pela superfície é suprimida.

Uma inspeção global das figuras mostra que para valores de K maiores que a unidade a temperatura cresce com o aumento da distância segundo o sentido da corrente livre; o inverso ocorre quando o referido parâmetro é menor que a unidade. Como será discutido mais tarde, um critério mais preciso para o aumento ou diminuição de T_w com x é dado por $K > (T_w / T_\infty)_0^4$ ou $K < (T_w / T_\infty)_0^4$, respectivamente, onde o índice 0 denota $x = 0$. Acrescente-se que, quando $K > (T_w / T_\infty)_0^4$, o aumento de T_w com x é mais rápido para maior K . Quando $K < (T_w / T_\infty)_0^4$, menores valores de K estão associados a diminuições mais rápidas de T_w com x .

A temperatura da parede, na origem é sempre inferior a T_∞ e é obtida da equação (36a), fazendo $x = 0$. Fisicamente, a forma assim simplificada da equação (36a) corresponde a um balanço entre o fluxo de calor para a placa por convecção e o calor latente necessário à sublimação. Estes dois mecanismos de transporte sobrepõem completamente os outros nas vizinhanças do início da parede ("leading edge"). Considerando que o fluxo de calor por convecção se dá no sentido do fluido para a parede, é evidente que $T_w < T_\infty$.

De um cuidadoso estudo da equação (36a), pode ser visto o aumento ou diminuição de T_w com x é condicionado no fato de ser ou não K maior que o valor de $(T_w / T_\infty)_0^4$. Além disto, observa-se que se T_w inicialmente cresce, continuará a crescer para qualquer x , atingindo uma temperatura de 32°F (fusão da parede) ou aproximando-se de um valor assintótico abaixo de 32°F . Analogamente, se T_w inicialmente decresce, continuará a decrescer, aproximando-se de um valor assintótico.

Nos casos em que $K > (T_w / T_\infty)_0^4$, a curva inicial encontra-se sempre acima das curvas ajustada e final; para $K < (T_w / T_\infty)_0^4$ o contrário é verificado. Portanto, para um x determinado, a curva inicial fornece um valor superior ao real para perfis crescentes de temperatura e inferior para situações em que a temperatura decresce com x . A curva ajustada está em boa concordância com a curva final em baixos valores da temperatura da corrente livre, porém substanciais desvios existem em altos T_∞ .

Para $K < (T_w / T_\infty)_0^4$, a curva ajustada corresponde sempre a uma aproximação melhor que a curva inicial. Por outro lado, quando $K > (T_w / T_\infty)_0^4$, existem alguns casos em que a curva inicial está mais próxima da final do que está a ajustada. Devido a seu fácil cálculo, a curva inicial é considerada como sendo suficientemente boa para uma primeira estimativa da distribuição de temperaturas.

À medida que a espessura das camadas limite térmica e de difusão aumenta com valores ascendentes de x , cresce a resistência às trocas de calor (por convecção) e massa (por difusão). Logo, quando $x \rightarrow \infty$, o balanço de energia (1) se reduz a

$$e_{r(1)} + e_p = e_{r(2)} \quad (44)$$

ou considerando (4), (5) e (7)

$$T_w = T_\infty \sqrt[4]{K} \quad (45)$$

onde $\sqrt[4]{K}$ é uma raiz real e positiva. Assim, T_w tende a um valor constante quando $x \rightarrow \infty$. Os valores assintóticos de T_w ($< 32^\circ\text{F}$ e $> -40^\circ\text{F}$) são mostrados nas figuras, em seu extremos direito. É evidente que, nos casos estudados, mesmo para os maiores valores da abscissa, a temperatura da parede é sub-

tancialmente diferente dos valores assintóticos. Para $K = (T_w / T_\infty)_0^4$, o valor assintótico é igual a T_{w0} .

Quando T_w se aproxima de uma constante (assíntota), então n_T , $n_W \rightarrow 0$. Portanto as curvas ajustada e final se aproximam assintoticamente da curva inicial, para a qual foi considerado $n_T = n_W = 0$. Da equação (45) obtém-se o valor máximo que K pode assumir sem que haja fusão da placa, isto é, $T_w < 32^\circ\text{F}$ em qualquer x . Para T_∞ igual a -10 , 0 , 10 e 20°F acha-se K máximo $1,43$, $1,31$, $1,20$ e $1,10$, respectivamente.

O método de similaridade local, conforme já mencionado, só deve ser aplicado em regiões onde a variação longitudinal é muito menor que a variação transversal da mesma. Quando $|T_w - T_\infty|$ é muito pequeno, o critério acima citado pode não ser satisfeito. Quando T_w aumenta muito lentamente ao longo da placa, pode haver um grande intervalo de x no qual $|T_w - T_\infty|$ é suficientemente pequeno para impedir o uso do modelo de similaridade local (ver, por exemplo, Figura 3, $T_\infty = 20^\circ\text{F}$).

Para baixos valores de K , o critério $n_W > -0,5$ (seção II - 3.2) é somente satisfeito em pontos muito próximos da origem. Logo, o método de similaridade local é de aplicabilidade limitada. Por esta razão, apenas curtos segmentos das curvas final e ajustada são mostrados nas Figuras 5 e 6. As curvas iniciais que aparecem nestas figuras correspondem a $n_T = n_W = 0$ e não são, portanto, truncados.

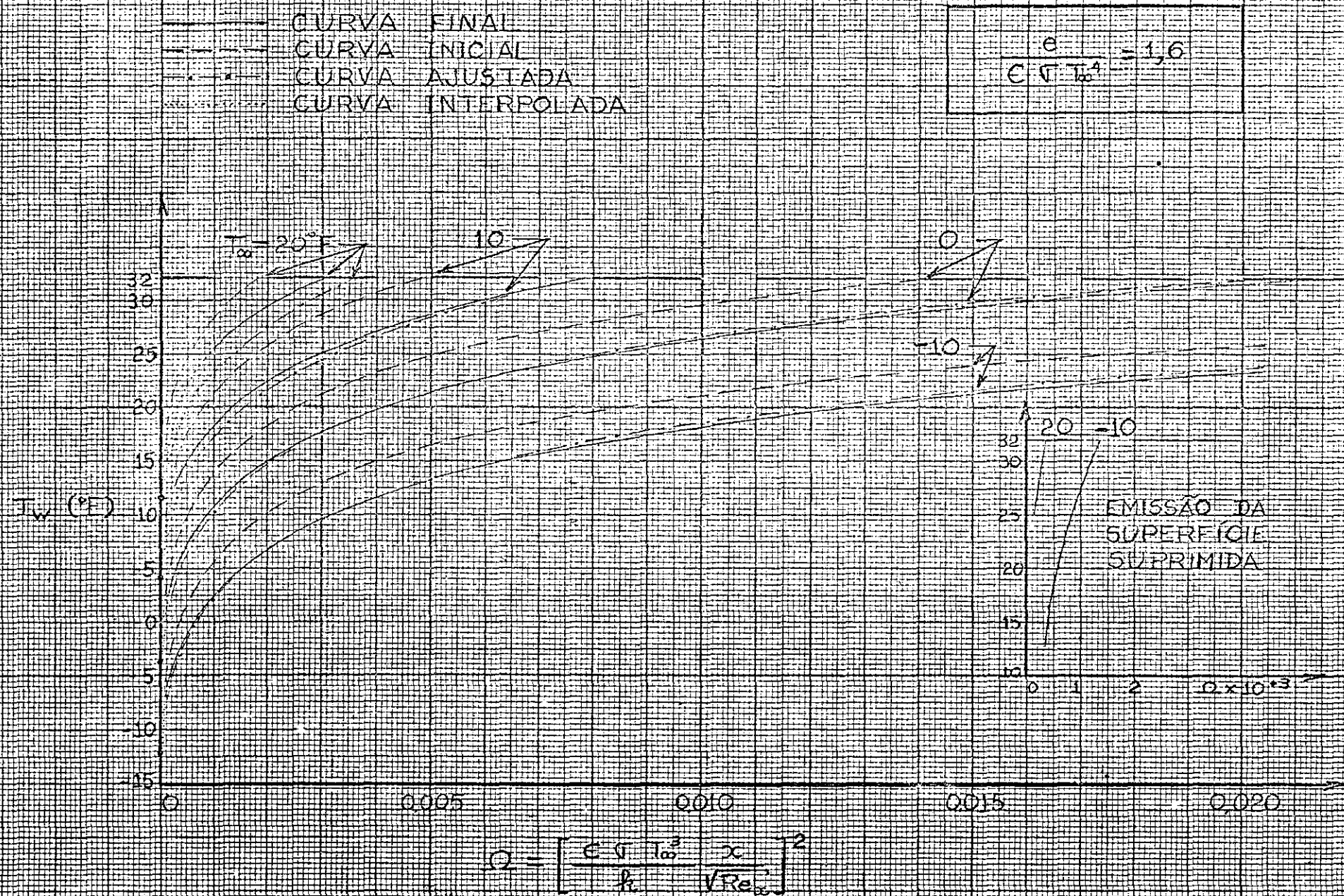
Uma vez mostrada a forte influência da radiação absorvida pela parede (por meio do parâmetro K), foi investigada a importância da consideração da radiação emitida pela mesma. Com este fim, as figuras 2 e 4 contêm curvas representativas de casos em que a emissão da superfície é suprimida. Nas tabelas encontradas no Apêndice aparece o parâmetro β , o qual é feito igual a

1,0 ou 0,0 dependendo, respectivamente, da consideração ou não da radiação emitida.

Observa-se, das figuras acima mencionadas, que há uma brusca ascenção da temperatura ao longo da placa quando $\beta = 0$. Além disto, na Figura 4 a supressão da emissão da superfície resulta em uma reversão da tendência decrescente de T_w com x , encontrado quando aquele fator é incluído. Com base nos resultados agora discutidos, pode ser concluído que a radiação emitida pela superfície é um fator importante na determinação da distribuição de temperaturas na superfície da placa.

A referência (1) estuda o problema para o caso $K = \beta = 0$, com a consequência de que T_w é uniforme ao longo da parede. Assim, $K \neq 0$ e $\beta = 0$ equivale a se supor no balanço de energia da referência (1) uma fonte adicional de calor, o que explica a tendência ascendente de temperaturas encontrada.

Figura 2 : Distribuição de temperaturas na parede



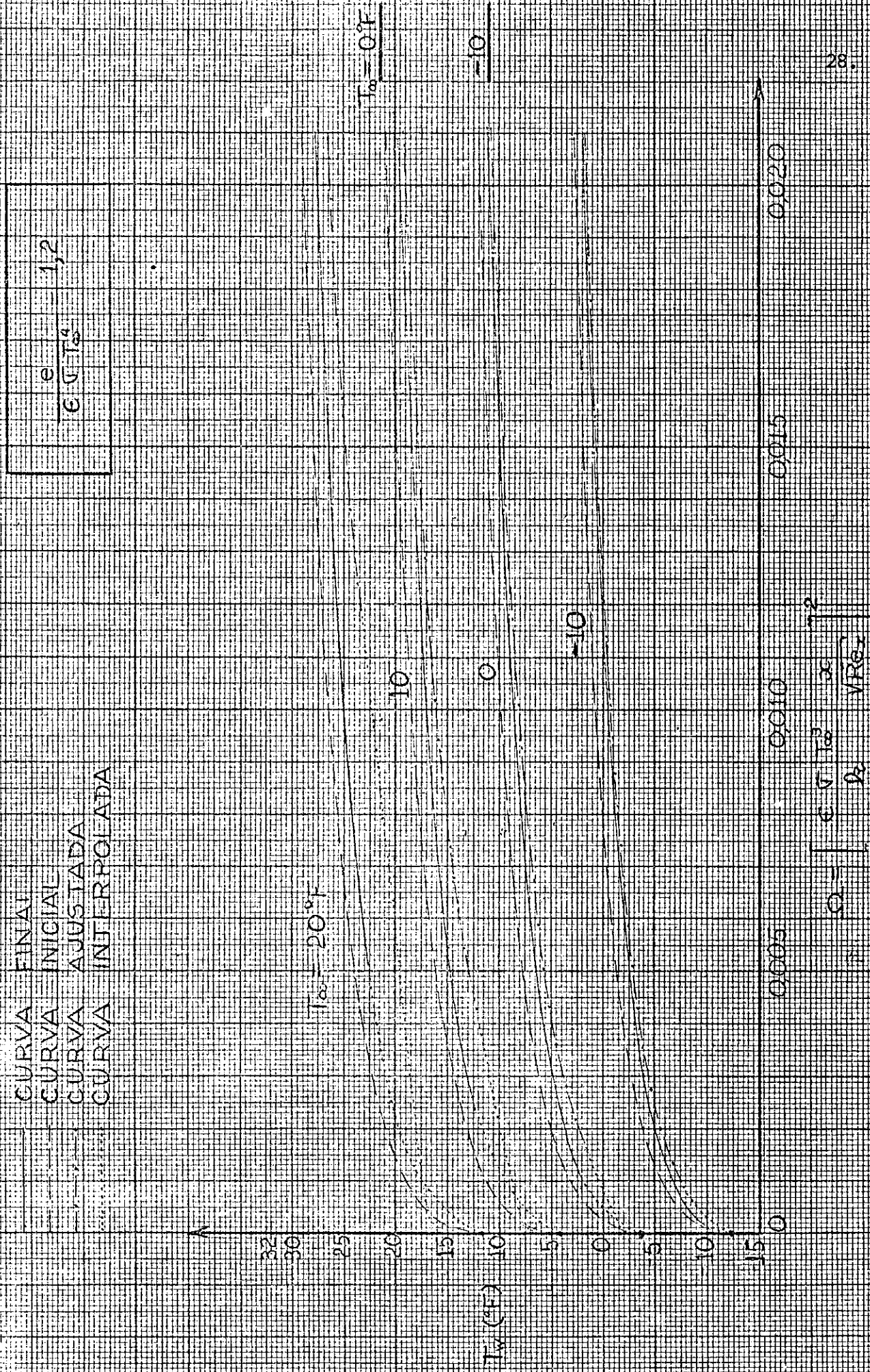


Figura 3 : Distribuição de Temperaturas na parede.

$$\frac{e}{C \sqrt{T_{\infty}}} = 0,8$$

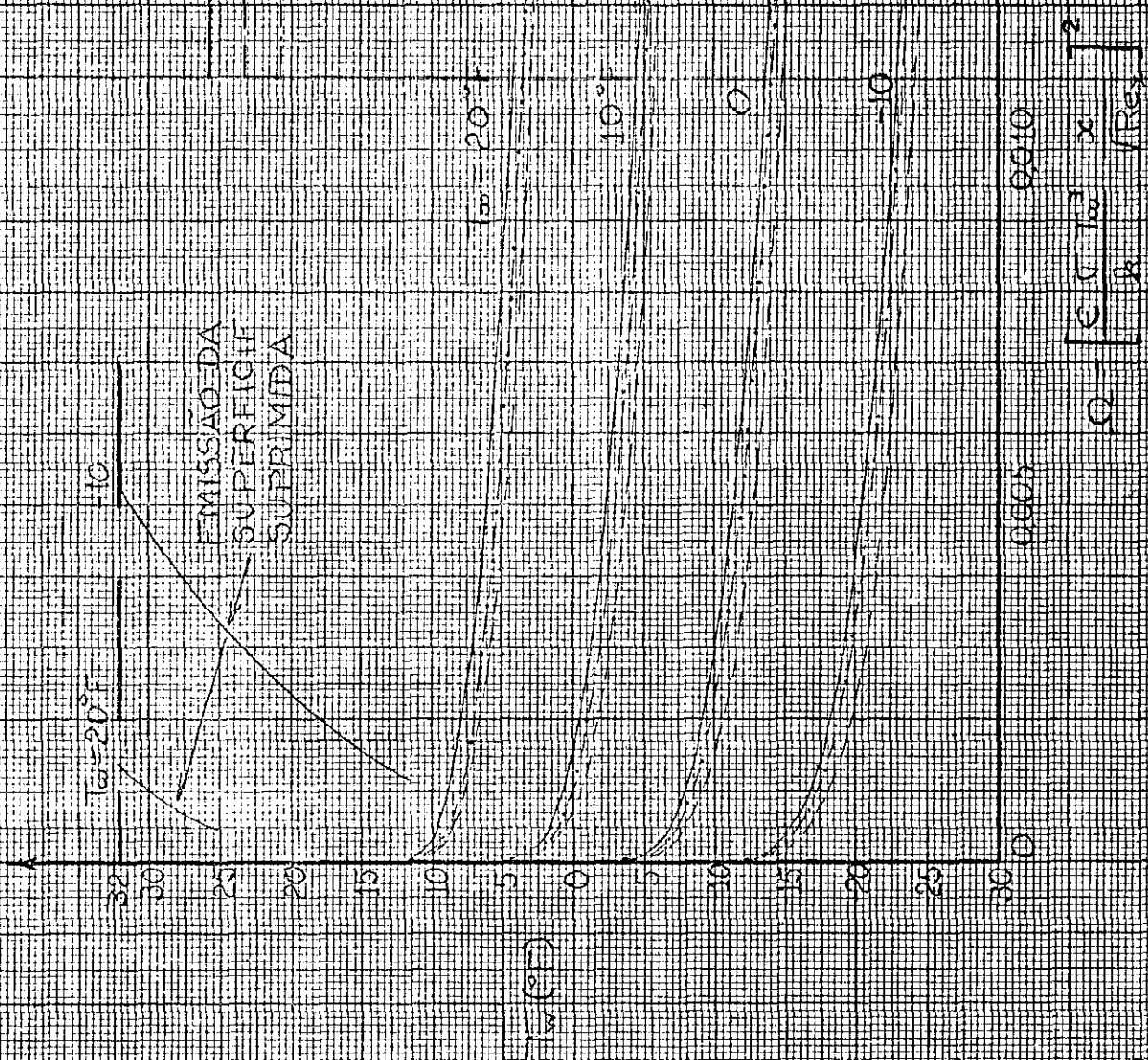


Figura 4 : Distribuição de temperaturas na parede

$T_{\infty} = 20^{\circ}\text{F}$

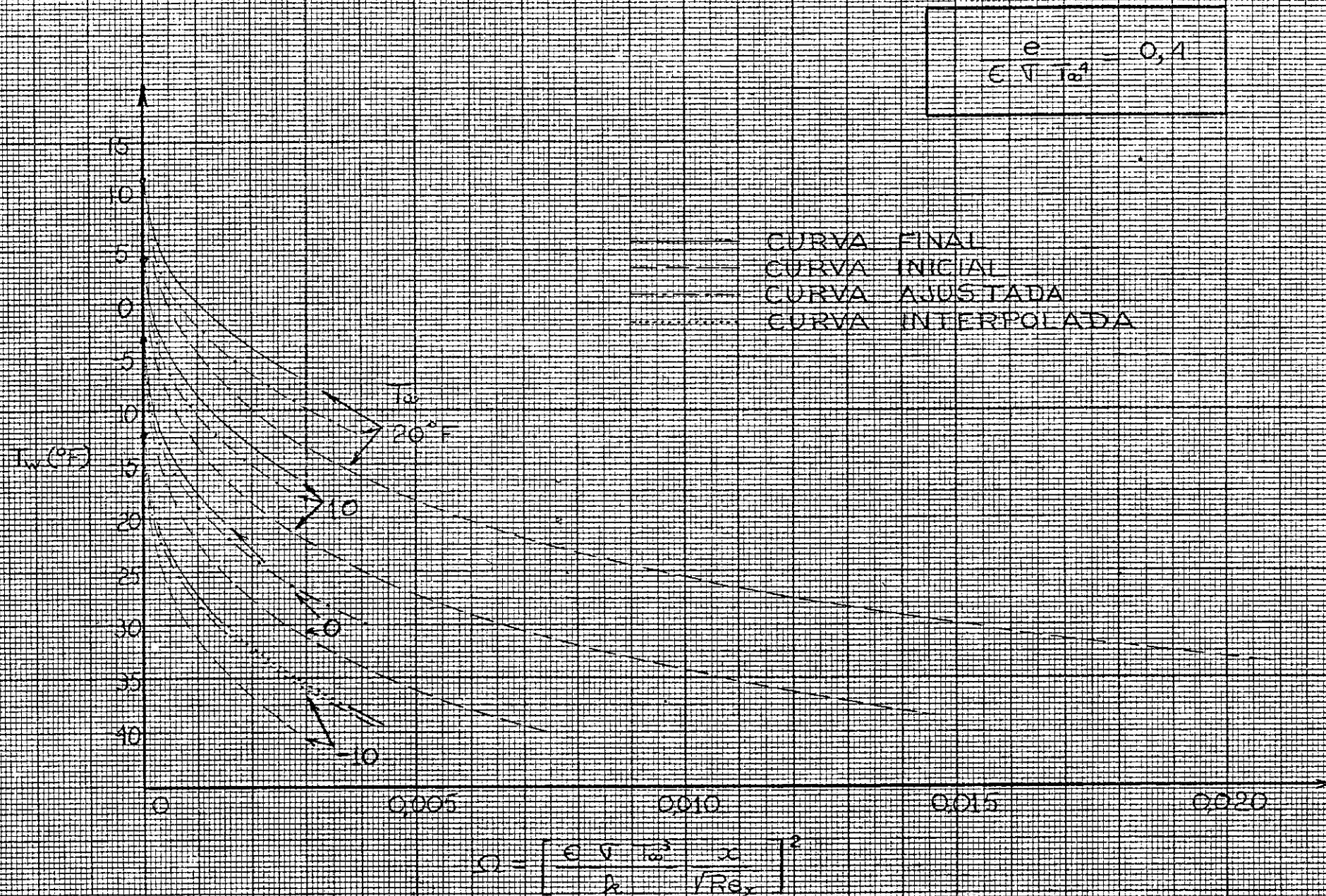
10

0

-10

29.

Figura 5: Distribuição de temperaturas na parede



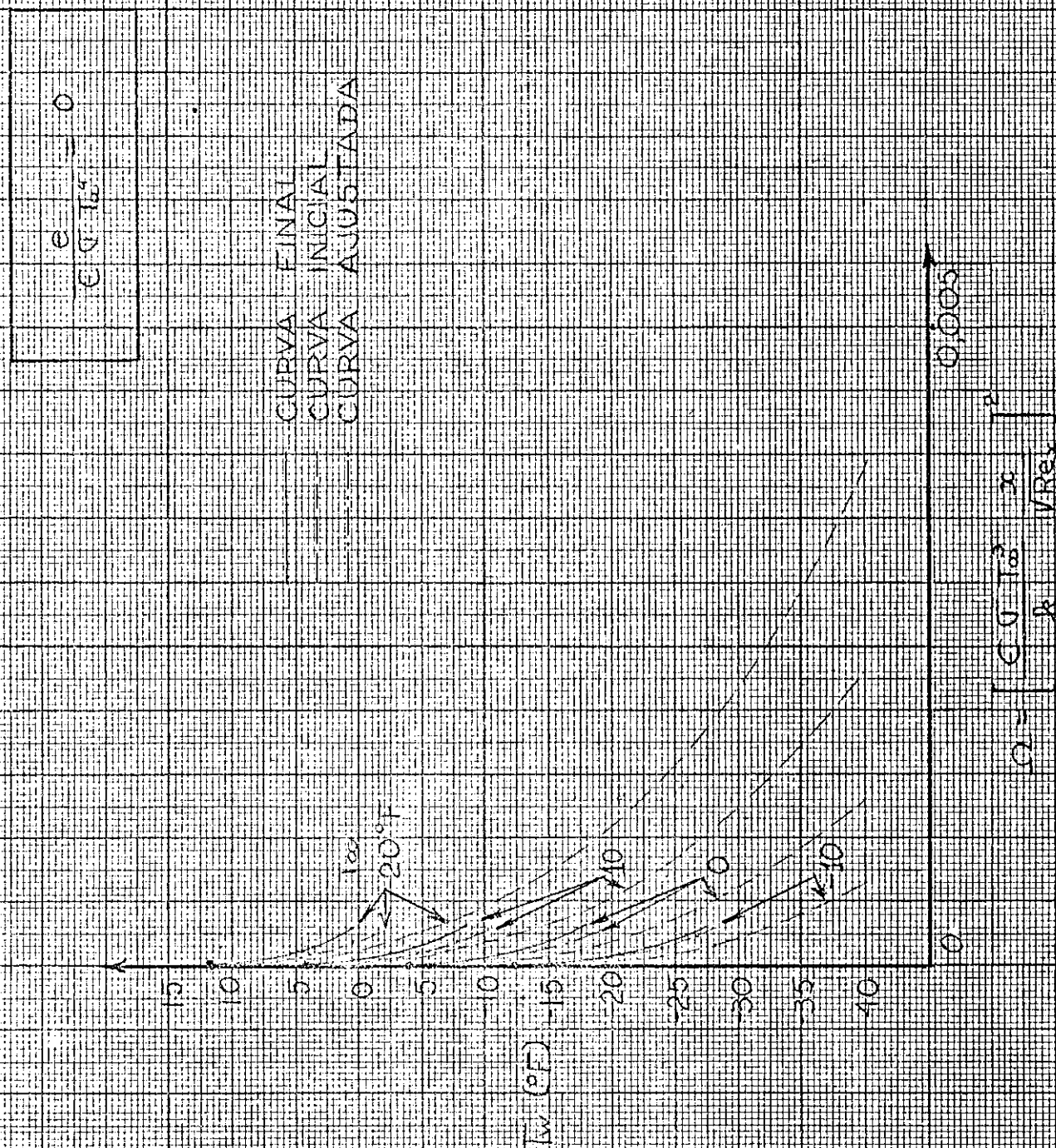


Figura 6 : Distribuição de temperaturas na parede

REFERÊNCIAS

1. J.P. Hartnett e E.R.G. Eckert, Mass transfer cooling in a laminar boundary layer with constant fluid properties, em Recent advances in heat and mass transfer, J.P. Hartnett, editor, McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, 1961.
2. S. Levy, Heat transfer to constant-property laminar boundary layer flows with power function free-stream velocity and wall-temperature variations, Journal of the Aeronautical Science, 19, 341 - 348 (1952).
3. D.R. Chapman e M.W. Rubesin, Temperature and velocity profiles in the compressible laminar boundary layer with arbitrary distribution of surface temperature, Journal of the Aeronautical Science, 16, 547 - 567 (1949)
4. E.M. Sparrow e S.H. Lin, Boundary layers with prescribed heat flux — application to simultaneous convection and radiation, International Journal of Heat and Mass Transfer, 8, 437 - 448 (1965).
5. J.H. Keenan e F.G. Keyes, Thermodynamic properties of steam, John Wiley and Sons, Inc., New York, 1936.
6. Anônimo, Subroutine RIMIT, em 1130 Scientific subroutine package (1130-CM 02X), Programmer's manual, IBM application program, 116.
7. E.R.G. Eckert e Robert M. Drake Jr., Heat and mass transfer, McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, 1959.

APÊNDICE A

Valores de $(d\theta / d\eta)_w$ e $(d\phi / d\eta)_w$, respectivamente
para $Pr = 0,7$ e $Sc = 0,55$

n_T e n_W	$(d\theta / d\eta)_w$	$(d\phi / d\eta)_w$
0,70	-0,4385	-0,4035
0,65	-0,4308	-0,3963
0,60	-0,4228	-0,3889
0,55	-0,4145	-0,3812
0,50	-0,4059	-0,3732
0,45	-0,3969	-0,3649
0,40	-0,3876	-0,3563
0,35	-0,3778	-0,3473
0,30	-0,3676	-0,3378
0,25	-0,3569	-0,3279
0,20	-0,3456	-0,3174
0,15	-0,3336	-0,3063
0,10	-0,3209	-0,2945
0,05	-0,3073	-0,2819
0,00	-0,2927	-0,2684
-0,05	-0,2769	-0,2538
-0,10	-0,2598	-0,2380
-0,15	-0,2409	-0,2206
-0,20	-0,2200	-0,2013
-0,25	-0,1966	-0,1797
-0,30	-0,1699	-0,1551
-0,35	-0,1389	-0,1266
-0,40	-0,1021	-0,0929
-0,45	-0,0571	-0,0519
-0,50	0,0000	0,0000

APÊNDICE B

Tabelas de valores numéricos relativos às distribuições de temperatura na parede

Nas tabelas que se seguem, o título de cada coluna tem o seguinte significado:

K	parâmetro de radiação-fonte, $e / \epsilon \sigma T_{\infty}^4$
TAMBF	T_{∞} (°F)
WAMB	W_{∞}
BETA	parâmetro que considera a radiação emitida (BETA = 1,0) ou não (BETA = 0,0)
PR	número de Prandtl, $\mu c_p / k$
SC	número de Schmidt, ν / D
CHI	coordenada adimensional, equação (9)
TWF-I	T_w (°F) , inicial e ajustada
TWF-F	T_w (°F) , final
OMEGA-I	Ω , inicial
OMEGA-A	Ω , ajustada
OMEGA-F	Ω , final
NT-A	n_T , resultante da primeira iteração
NW-A	n_w , resultante da primeira iteração
NT-F	n_T , resultante da última iteração
NW-F	n_w , resultante da última iteração
NURE-F	$Nu_x / \sqrt{Re_x}$, obtido a partir de NT-F
DFIW-F	$(d\phi / dn)_w$, obtido a partir de NW-F

TABELA PARA K= 1.6 TAMBF= -10.0 WAMB= 0.0 BETA= 1.0 PR= 0.70 SC= 0.55

CHI	TWF-I	OMEGA-I	NT-A	NW-A	OMEGA-A	TWF-F	OMEGA-F	NT-F	NW-F	NURE-F	DFI-F
0.0000	-12.39	0.000000	0.000	0.000	0.000000	-12.39	0.000000	0.000	0.000	0.2926	-0.268
0.0001	-10.03	0.000008	*****	0.064							
0.0005	-7.36	0.000042	0.871	0.125	0.000107	-6.70	0.000096	0.712	0.127	0.4404	-0.301
0.0008	-6.18	0.000068	0.725	0.150	0.000156	-5.59	0.000147	0.639	0.152	0.4291	-0.306
0.0010	-5.53	0.000085	0.691	0.165	0.000191	-4.97	0.000182	0.624	0.167	0.4267	-0.310
0.0020	-3.15	0.000171	0.568	0.206	0.000348	-2.69	0.000340	0.539	0.208	0.4127	-0.319
0.0050	0.94	0.000428	0.464	0.265	0.000798	1.23	0.000792	0.455	0.266	0.3980	-0.331
0.0070	2.72	0.000599	0.431	0.293	0.001083	2.95	0.001080	0.428	0.287	0.3928	-0.335
0.0100	4.76	0.000856	0.405	0.305	0.001510	4.93	0.001505	0.402	0.306	0.3880	-0.339
0.0200	9.12	0.001713	0.345	0.331	0.002842	9.14	0.002841	0.345	0.331	0.3769	-0.343
0.0300	11.85	0.002569	0.313	0.340	0.004115	11.79	0.004118	0.313	0.340	0.3705	-0.345
0.0400	13.83	0.003426	0.291	0.342	0.005350	13.71	0.005357	0.292	0.342	0.3659	-0.345
0.0500	15.39	0.004283	0.274	0.342	0.006559	15.23	0.006570	0.275	0.342	0.3624	-0.345
0.0600	16.66	0.005139	0.261	0.340	0.007747	16.47	0.007762	0.262	0.340	0.3596	-0.345
0.0700	17.72	0.005996	0.250	0.336	0.008922	17.48	0.008910	0.249	0.351	0.3567	-0.347
0.0800	18.65	0.006853	0.241	0.332	0.010082	18.42	0.010103	0.243	0.332	0.3553	-0.344
0.0900	19.46	0.007709	0.233	0.329	0.011228	19.22	0.011254	0.235	0.329	0.3536	-0.343
0.1000	20.19	0.008566	0.227	0.326	0.012374	19.93	0.012404	0.228	0.326	0.3521	-0.342
0.1200	21.42	0.010279	0.214	0.320	0.014616	21.15	0.014654	0.216	0.321	0.3494	-0.341
0.1300	21.96	0.011136	0.209	0.318	0.015726	21.68	0.015768	0.211	0.318	0.3482	-0.341
0.1500	22.91	0.012849	0.200	0.312	0.017926	22.62	0.017976	0.202	0.313	0.3461	-0.340
0.1700	23.73	0.014562	0.192	0.307	0.020104	23.43	0.020162	0.194	0.308	0.3443	-0.339
0.2000	24.78	0.017132	0.183	0.300	0.023338	24.47	0.023407	0.185	0.301	0.3421	-0.338
0.2200	25.38	0.018845	0.177	0.296	0.025474	25.07	0.025550	0.179	0.297	0.3407	-0.337
0.2500	26.17	0.021415	0.170	0.289	0.028654	25.86	0.028742	0.172	0.291	0.3390	-0.336

TABELA PARA K= 1.6 TAMBF= 0.0 WAMB= 0.0 BETA= 1.0 PR= 0.70 SC= 0.55

CHI	TWF-I	OMEGA-I	NT-A	NW-A	OMEGA-A	TWF-F	OMEGA-F	NT-F	NW-F	NURE-F	DFI-F
0.0000	-3.82	0.000000	0.000	0.000	0.000000	-3.82	0.000000	0.000	0.000	0.2926	-0.268
0.0001	-1.51	0.000008	-0.750	0.059							
0.0005	1.10	0.000042	2.039	0.117		2.33	0.000115	0.988	0.126	0.4801	-0.300
0.0008	2.26	0.000068	1.197	0.141	0.000209	3.35	0.000167	0.833	0.144	0.4581	-0.305
0.0010	2.89	0.000085	1.042	0.157	0.000238	3.93	0.000204	0.791	0.159	0.4521	-0.308
0.0020	5.23	0.000171	0.730	0.194	0.000392	6.06	0.000369	0.642	0.197	0.4296	-0.316
0.0050	9.25	0.000428	0.540	0.251	0.000852	9.82	0.000835	0.515	0.253	0.4086	-0.328
0.0070	11.01	0.000599	0.493	0.271	0.001147	11.48	0.001131	0.478	0.273	0.4020	-0.332
0.0100	13.03	0.000856	0.453	0.292	0.001581	13.39	0.001567	0.444	0.293	0.3959	-0.336
0.0200	17.35	0.001713	0.377	0.323	0.002937	17.48	0.002931	0.375	0.323	0.3828	-0.342
0.0300	20.07	0.002569	0.341	0.327	0.004246	20.10	0.004244	0.341	0.327	0.3761	-0.343
0.0400	22.06	0.003426	0.316	0.331	0.005508	22.01	0.005511	0.317	0.331	0.3712	-0.343
0.0500	23.63	0.004283	0.297	0.333	0.006741	23.51	0.006751	0.299	0.333	0.3674	-0.344
0.0600	24.91	0.005139	0.283	0.333	0.007954	24.75	0.007969	0.284	0.333	0.3644	-0.344
0.0700	26.00	0.005996	0.271	0.332	0.009150	25.80	0.009170	0.273	0.331	0.3619	-0.343
0.0800	26.94	0.006853	0.261	0.330	0.010332	26.71	0.010358	0.263	0.330	0.3598	-0.343
0.0900	27.77	0.007709	0.252	0.327	0.011503	27.52	0.011534	0.255	0.328	0.3579	-0.343
0.1000	28.51	0.008566	0.246	0.325	0.012675	28.24	0.012711	0.248	0.326	0.3565	-0.342
0.1200	29.78	0.010279	0.233	0.320	0.014971	29.48	0.015016	0.235	0.320	0.3537	-0.341
0.1300	30.33	0.011136	0.228	0.317	0.016108	30.02	0.016158	0.230	0.318	0.3525	-0.341
0.1500	31.32	0.012849	0.218	0.311	0.018365	30.99	0.018424	0.221	0.312	0.3504	-0.340
0.1656	32.00	0.014190	0.212	0.307	0.020117	31.66	0.020182	0.215	0.308	0.3490	-0.339
0.1741						32.00	0.021130	0.212	0.306	0.3483	-0.339

TABELA PARA K= 1.6 TAMBF= 10.0 WAMB= 0.0 BETA= 1.0 PR= 0.70 SC= 0.55

CHI	TWF-I	OMEGA-I	NT-A	NW-A	OMEGA-A	TWF-F	OMEGA-F	NT-F	NW-F	NURE-F	DFI-F
0.0000	4.17	0.000000	0.000	0.000	0.000000	4.17	0.000000	0.000	0.000	0.2926	-0.268
0.0001	6.42	0.000008	-0.307	0.055	0.000002	4.67	0.000004	-0.197	0.053	0.2210	-0.282
0.0005	8.96	0.000042	-2.106	0.109							
0.0008	10.09	0.000068	28.349	0.132							
0.0010	10.70	0.000085	4.155	0.146		12.65	0.000255	1.159	0.152	0.5058	-0.306
0.0020	12.98	0.000171	1.247	0.183		14.49	0.000425	0.854	0.189	0.4611	-0.314
0.0050	16.90	0.000428	0.708	0.238	0.000967	17.95	0.000913	0.628	0.241	0.4273	-0.326
0.0070	18.62	0.000599	0.619	0.256	0.001270	19.52	0.001222	0.569	0.259	0.4178	-0.329
0.0100	20.60	0.000856	0.549	0.276	0.001717	21.34	0.001675	0.519	0.279	0.4093	-0.333
0.0200	24.88	0.001713	0.438	0.307	0.003117	25.28	0.003089	0.428	0.308	0.3930	-0.339
0.0300	27.58	0.002569	0.388	0.319	0.004456	27.81	0.004438	0.384	0.319	0.3846	-0.341
0.0400	29.58	0.003426	0.358	0.323	0.005758	29.68	0.005749	0.356	0.323	0.3791	-0.342
0.0500	31.15	0.004283	0.336	0.324	0.007036	31.18	0.007032	0.336	0.324	0.3750	-0.342
0.0562	32.00	0.004820	0.325	0.323	0.007826	31.99	0.007827	0.325	0.323	0.3729	-0.342
0.0563						32.00	0.007834	0.325	0.323	0.3729	-0.342

TABELA PARA K= 1.6 TAMBF= 20.0 WAMB= 0.0 BETA= 1.0 PR= 0.70 SC= 0.55

CHI	TWF-I	OMEGA-I	NT-A	NW-A	OMEGA-A	TWF-F	OMEGA-F	NT-F	NW-F	NURE-F	DFI-F
0.0000	11.54	0.000000	0.000	0.000	0.000000	11.54	0.000000	0.000	0.000	0.2926	-0.268
0.0001	13.70	0.000008	-0.168	0.052	0.000005	12.27	0.000006	-0.132	0.050	0.2476	-0.282
0.0005	16.15	0.000042	-0.548	0.103							
0.0008	17.24	0.000068	-0.925	0.124							
0.0010	17.83	0.000085	-1.310	0.138							
0.0020	20.03	0.000171	95.850	0.172							
0.0050	23.86	0.000428	1.236	0.225		25.77	0.001061	0.852	0.231	0.4608	-0.324
0.0070	25.54	0.000599	0.940	0.245	0.001568	27.18	0.001386	0.743	0.249	0.4450	-0.327
0.0100	27.47	0.000856	0.762	0.265	0.002006	28.85	0.001864	0.656	0.268	0.4318	-0.331
0.0209	32.00	0.001796	0.545	0.295	0.003588	32.87	0.003495	0.513	0.295	0.4082	-0.336
0.0180						32.00	0.003068	0.538	0.291	0.4125	-0.336

TABELA PARA K= 1.2 TAMBF= -10.0 WAMB= 0.0 BETA= 1.0 PR= 0.70 SC= 0.55

CHI	TWF-I	OMEGA-I	NT-A	NW-A	OMEGA-A	TWF-F	OMEGA-F	NT-F	NW-F	NURE-F	DFI-F
0.0000	-12.39	0.000000	0.000	0.000	0.000000	-12.39	0.000000	0.000	0.000	0.2926	-0.268
0.0001	-11.54	0.000008	-0.268	0.023	0.000003	-12.21	0.000005	-0.186	0.022	0.2259	-0.274
0.0005	-10.58	0.000042	-1.428	0.046							
0.0008	-10.15	0.000068	-6.687	0.056							
0.0010	-9.91	0.000085	13.334	0.062		-9.03	0.000259	1.181	0.062	0.5095	-0.285
0.0020	-9.03	0.000171	1.499	0.079		-8.32	0.000428	0.864	0.079	0.4626	-0.289
0.0050	-7.49	0.000428	0.772	0.106	0.001009	-6.95	0.000916	0.633	0.105	0.4281	-0.295
0.0070	-6.81	0.000599	0.666	0.115	0.001314	-6.32	0.001227	0.575	0.114	0.4187	-0.298
0.0100	-6.02	0.000856	0.585	0.126	0.001768	-5.58	0.001683	0.525	0.125	0.4103	-0.300
0.0200	-4.30	0.001713	0.464	0.141	0.003191	-3.96	0.003109	0.435	0.140	0.3942	-0.304
0.0300	-3.20	0.002569	0.409	0.147	0.004548	-2.91	0.004464	0.390	0.146	0.3857	-0.305
0.0400	-2.39	0.003426	0.374	0.150	0.005859	-2.14	0.005774	0.360	0.149	0.3799	-0.306
0.0500	-1.75	0.004283	0.350	0.152	0.007138	-1.53	0.007052	0.338	0.150	0.3755	-0.306
0.0600	-1.22	0.005139	0.330	0.152	0.008391	-1.02	0.008304	0.321	0.151	0.3720	-0.306
0.0700	-0.77	0.005996	0.315	0.152	0.009623	-0.59	0.009535	0.306	0.151	0.3690	-0.306
0.0800	-0.38	0.006853	0.302	0.152	0.010838	-0.21	0.010749	0.294	0.150	0.3665	-0.306
0.0900	-0.04	0.007709	0.290	0.151	0.012037	0.11	0.011948	0.284	0.150	0.3643	-0.306
0.1000	0.26	0.008566	0.281	0.151	0.013236	0.40	0.013146	0.276	0.149	0.3625	-0.306
0.1200	0.78	0.010279	0.265	0.149	0.015574	0.91	0.015483	0.260	0.148	0.3592	-0.305
0.1300	1.01	0.011136	0.258	0.148	0.016729	1.13	0.016638	0.253	0.147	0.3577	-0.305
0.1500	1.41	0.012849	0.246	0.146	0.019014	1.52	0.018923	0.242	0.145	0.3551	-0.305
0.1700	1.76	0.014562	0.235	0.144	0.021272	1.86	0.021181	0.232	0.143	0.3529	-0.304
0.2000	2.21	0.017132	0.222	0.141	0.024615	2.29	0.024524	0.219	0.140	0.3501	-0.304
0.2200	2.46	0.018845	0.213	0.155	0.026744	2.52	0.026679	0.211	0.154	0.3482	-0.307
0.2500	2.80	0.021415	0.206	0.136	0.030097	2.87	0.030006	0.203	0.136	0.3464	-0.303

TABELA PARA K= 1.2 TAMBF= 0.0 WAMB= 0.0 BETA= 1.0 PR= 0.70 SC= 0.55

CHI	TWF-I	OMEGA-I	NT-A	NW-A	OMEGA-A	TWF-F	OMEGA-F	NT-F	NW-F	NURE-F	DFI-F
0.0000	-3.82	0.0000000	0.000	0.000	0.0000000	-3.82	0.0000000	0.000	0.000	0.2926	-0.268
0.0001	-2.97	0.0000008	-0.142	0.022	0.0000005	-3.54	0.0000006	-0.118	0.022	0.2529	-0.274
0.0005	-1.98	0.0000042	-0.428	0.044	0.0000003	-3.53	0.0000020	-0.239	0.044	0.2018	-0.280
0.0008	-1.54	0.0000068	-0.669	0.054							
0.0010	-1.30	0.0000085	-0.887	0.060							
0.0020	-0.40	0.0000171	-3.664	0.077							
0.0050	1.18	0.0000428	1.691	0.104		2.23	0.001087	0.891	0.103	0.4664	-0.295
0.0070	1.88	0.0000599	1.164	0.114	0.001796	2.81	0.001415	0.774	0.113	0.4497	-0.297
0.0100	2.70	0.0000856	0.890	0.128	0.002174	3.52	0.001897	0.680	0.123	0.4355	-0.300
0.0200	4.49	0.001713	0.615	0.141	0.003618	5.12	0.003393	0.534	0.140	0.4119	-0.303
0.0300	5.65	0.002569	0.518	0.149	0.005021	6.17	0.004810	0.469	0.147	0.4004	-0.305
0.0400	6.50	0.003426	0.463	0.153	0.006381	6.96	0.006175	0.428	0.151	0.3929	-0.306
0.0500	7.18	0.004283	0.426	0.155	0.007708	7.59	0.007504	0.399	0.153	0.3874	-0.307
0.0600	7.74	0.005139	0.399	0.156	0.009007	8.11	0.008805	0.376	0.154	0.3830	-0.307
0.0700	8.22	0.005996	0.377	0.156	0.010284	8.56	0.010083	0.358	0.154	0.3795	-0.307
0.0800	8.63	0.006853	0.360	0.156	0.011542	8.95	0.011342	0.343	0.154	0.3765	-0.307
0.0900	9.00	0.007709	0.345	0.156	0.012784	9.30	0.012584	0.330	0.154	0.3739	-0.307
0.1000	9.33	0.008566	0.333	0.156	0.014026	9.61	0.013825	0.320	0.154	0.3718	-0.307
0.1200	9.89	0.010279	0.312	0.154	0.016443	10.14	0.016242	0.301	0.152	0.3679	-0.306
0.1300	10.14	0.011136	0.303	0.154	0.017636	10.37	0.017435	0.293	0.152	0.3662	-0.306
0.1500	10.57	0.012849	0.288	0.152	0.019997	10.79	0.019796	0.279	0.150	0.3632	-0.306
0.1700	10.95	0.014562	0.275	0.150	0.022327	11.15	0.022126	0.267	0.149	0.3607	-0.306
0.2000	11.44	0.017132	0.259	0.148	0.025774	11.61	0.025573	0.253	0.146	0.3575	-0.305
0.2200	11.72	0.018845	0.250	0.146	0.028045	11.88	0.027844	0.244	0.144	0.3557	-0.305
0.2500	12.09	0.021415	0.239	0.143	0.031416	12.24	0.031215	0.234	0.142	0.3533	-0.304

CHI	TWF-I	OMEGA-I	NT-A	NW-A	OMEGA-A	TWF-F	OMEGA-F	NT-F	NW-F	NURE-F	DFI-F
0.0000	4.17	0.000000	0.000	0.000	0.000000	4.17	0.000000	0.000	0.000	0.2926	-0.268
0.0001	5.04	0.000008	-0.086	0.021	0.000007	4.51	0.000007	-0.077	0.021	0.2675	-0.274
0.0005	6.03	0.000042	-0.218	0.044	0.000022	4.75	0.000027	-0.164	0.044	0.2351	-0.280
0.0008	6.48	0.000068	-0.300	0.053	0.000022	4.78	0.000038	-0.201	0.053	0.2194	-0.282
0.0010	6.73	0.000085	-0.362	0.059	0.000017	4.73	0.000043	-0.223	0.060	0.2095	-0.284
0.0020	7.65	0.000171	-0.648	0.076							
0.0050	9.28	0.000428	-2.894	0.103							
0.0070	10.01	0.000599	*****	0.113							
0.0100	10.86	0.000856	2.898	0.125		12.43	0.002347	1.019	0.123	0.4845	-0.300
0.0200	12.74	0.001713	1.059	0.144	0.004808	13.91	0.003928	0.731	0.141	0.4432	-0.304
0.0300	13.95	0.002569	0.782	0.152	0.006095	14.93	0.005431	0.616	0.149	0.4255	-0.306
0.0400	14.86	0.003426	0.658	0.157	0.007470	15.72	0.006878	0.551	0.154	0.4146	-0.307
0.0500	15.58	0.004283	0.585	0.160	0.008837	16.35	0.008282	0.506	0.157	0.4069	-0.307
0.0600	16.18	0.005139	0.535	0.162	0.010186	16.88	0.009653	0.473	0.159	0.4011	-0.308
0.0700	16.69	0.005996	0.498	0.163	0.011516	17.34	0.010999	0.447	0.159	0.3963	-0.308
0.0800	17.14	0.006853	0.469	0.163	0.012829	17.74	0.012328	0.426	0.159	0.3925	-0.308
0.0900	17.53	0.007709	0.437	0.175	0.014021	18.10	0.013634	0.408	0.159	0.3892	-0.308
0.1000	17.89	0.008566	0.427	0.163	0.015434	18.42	0.014938	0.394	0.159	0.3864	-0.308
0.1200	18.50	0.010279	0.396	0.162	0.017961	18.98	0.017472	0.368	0.158	0.3815	-0.308
0.1300	18.77	0.011136	0.383	0.161	0.019208	19.23	0.018722	0.358	0.158	0.3795	-0.308
0.1500	19.25	0.012849	0.361	0.160	0.021672	19.67	0.021192	0.340	0.157	0.3758	-0.307
0.1700	19.67	0.014562	0.343	0.158	0.024103	20.05	0.023627	0.325	0.155	0.3728	-0.307
0.2000	20.20	0.017132	0.321	0.156	0.027696	20.55	0.027224	0.306	0.154	0.3689	-0.307
0.2200	20.52	0.018845	0.309	0.155	0.030061	20.84	0.029591	0.295	0.152	0.3667	-0.306
0.2500	20.93	0.021415	0.294	0.153	0.033569	21.22	0.033102	0.282	0.150	0.3638	-0.306

CHI	TWF-I	OMEGA-I	NT-A	NW-A	OMEGA-A	TWF-F	OMEGA-F	NT-F	NW-F	NURE-F	DFI-F
0.0000	11.54	0.000000	0.000	0.000	0.000000	11.54	0.000000	0.000	0.000	0.2926	-0.268
0.0001	12.42	0.000008	-0.057	0.021	0.000007	11.92	0.000007	-0.053	0.021	0.2757	-0.274
0.0005	13.43	0.000042	-0.134	0.043	0.000030	12.29	0.000032	-0.113	0.043	0.2548	-0.280
0.0008	13.88	0.000068	-0.175	0.053	0.000042	12.41	0.000047	-0.140	0.053	0.2445	-0.282
0.0010	14.14	0.000085	-0.205	0.059	0.000047	12.43	0.000056	-0.158	0.059	0.2377	-0.284
0.0020	15.08	0.000171	-0.315	0.076	0.000051	12.60	0.000093	-0.209	0.076	0.2160	-0.288
0.0050	16.75	0.000428	-0.654	0.103							
0.0070	17.50	0.000599	-0.920	0.120							
0.0100	18.38	0.000856	-1.623	0.126							
0.0200	20.34	0.001713	8.747	0.145		22.58	0.005106	1.156	0.141	0.5053	-0.304
0.0300	21.63	0.002569	2.007	0.156		23.46	0.006654	0.923	0.151	0.4709	-0.306
0.0400	22.60	0.003426	1.314	0.162		24.19	0.008194	0.794	0.157	0.4526	-0.308
0.0500	23.37	0.004283	1.039	0.166	0.011879	24.79	0.009697	0.712	0.161	0.4403	-0.308
0.0600	24.01	0.005139	0.887	0.168	0.013020	25.31	0.011162	0.653	0.163	0.4313	-0.309
0.0700	24.57	0.005996	0.788	0.170	0.014286	25.76	0.012601	0.609	0.165	0.4242	-0.309
0.0800	25.05	0.006853	0.718	0.171	0.015587	26.16	0.014014	0.574	0.166	0.4185	-0.310
0.0900	25.48	0.007709	0.666	0.172	0.016899	26.52	0.015406	0.545	0.167	0.4137	-0.310
0.1000	25.86	0.008566	0.626	0.172	0.018233	26.85	0.016796	0.522	0.167	0.4098	-0.310
0.1200	26.53	0.010279	0.563	0.172	0.020842	27.42	0.019492	0.483	0.167	0.4030	-0.310
0.1300	26.83	0.011136	0.539	0.172	0.022137	27.67	0.020820	0.467	0.167	0.4001	-0.310
0.1500	27.35	0.012849	0.499	0.172	0.024709	28.13	0.023440	0.441	0.167	0.3953	-0.310
0.1700	27.81	0.014562	0.469	0.171	0.027253	28.53	0.026022	0.419	0.166	0.3912	-0.309
0.2000	28.41	0.017132	0.433	0.169	0.031023	29.06	0.029831	0.392	0.164	0.3862	-0.309
0.2200	28.75	0.018845	0.414	0.168	0.033507	29.37	0.032334	0.378	0.163	0.3833	-0.309
0.2500	29.21	0.021415	0.390	0.166	0.037193	29.78	0.036044	0.359	0.162	0.3797	-0.309

TABELA PARA K= 0.8 TAMBF= -10.0 WAMB= 0.0 BETA= 1.0 PR= 0.70 SC= 0.55

CHI	TWF-I	OMEGA-I	NT-A	NW-A	OMEGA-A	TWF-F	OMEGA-F	NT-F	NW-F	NURE-F	DFI-F
0.0000	-12.39	0.0000000	0.000	0.000	0.0000000	-12.39	0.0000000	0.000	0.000	0.2926	-0.268
0.0001	-13.08	0.0000008	0.110	-0.018	0.0000010	-12.83	0.0000010	0.122	-0.019	0.3267	-0.262
0.0005	-13.87	0.0000042	0.178	-0.037	0.0000057	-13.52	0.0000059	0.203	-0.039	0.3463	-0.256
0.0008	-14.23	0.0000068	0.199	-0.045	0.0000095	-13.85	0.0000099	0.227	-0.047	0.3518	-0.254
0.0010	-14.43	0.0000095	0.213	-0.051	0.0000121	-14.03	0.0000126	0.243	-0.053	0.3555	-0.252
0.0020	-15.17	0.0000171	0.235	-0.066	0.0000250	-14.76	0.0000260	0.267	-0.068	0.3606	-0.248
0.0050	-16.48	0.0000428	0.256	-0.091	0.0000641	-16.07	0.0000664	0.285	-0.095	0.3645	-0.239
0.0070	-17.06	0.0000599	0.259	-0.101	0.0000902	-16.67	0.0000932	0.287	-0.105	0.3649	-0.236
0.0100	-17.75	0.0000856	0.262	-0.113	0.0001292	-17.37	0.0001332	0.287	-0.118	0.3650	-0.231
0.0200	-19.27	0.0001713	0.253	-0.134	0.0002559	-18.93	0.0002623	0.274	-0.139	0.3621	-0.224
0.0300	-20.25	0.0002569	0.244	-0.145	0.0003796	-19.95	0.0003877	0.261	-0.150	0.3595	-0.220
0.0400	-20.99	0.0003426	0.236	-0.152	0.0005009	-20.71	0.0005104	0.251	-0.157	0.3572	-0.217
0.0500	-21.57	0.0004283	0.229	-0.157	0.0006204	-21.32	0.0006311	0.242	-0.162	0.3552	-0.216
0.0600	-22.06	0.0005139	0.222	-0.160	0.0007384	-21.82	0.0007500	0.234	-0.165	0.3535	-0.214
0.0700	-22.48	0.0005996	0.217	-0.162	0.0008550	-22.25	0.0008674	0.228	-0.167	0.3520	-0.214
0.0800	-22.84	0.0006853	0.211	-0.163	0.0009705	-22.63	0.0009836	0.222	-0.168	0.3506	-0.213
0.0900	-23.16	0.0007709	0.207	-0.164	0.0010849	-22.96	0.0010987	0.216	-0.169	0.3494	-0.213
0.1000	-23.45	0.0008566	0.203	-0.165	0.0011994	-23.25	0.0012138	0.212	-0.170	0.3483	-0.213
0.1200	-23.94	0.0010279	0.195	-0.165	0.0014240	-23.77	0.0014394	0.203	-0.169	0.3463	-0.213
0.1300	-24.16	0.0011136	0.191	-0.164	0.0015354	-23.99	0.0015511	0.199	-0.169	0.3454	-0.213
0.1500	-24.55	0.0012849	0.185	-0.163	0.0017563	-24.39	0.0017727	0.192	-0.168	0.3437	-0.213
0.1700	-24.88	0.0014562	0.179	-0.162	0.0019751	-24.74	0.0019921	0.186	-0.166	0.3423	-0.214
0.2000	-25.32	0.0017132	0.172	-0.159	0.0023000	-25.18	0.0023177	0.178	-0.163	0.3404	-0.215
0.2200	-25.57	0.0018845	0.168	-0.157	0.0025147	-25.44	0.0025328	0.173	-0.161	0.3393	-0.216
0.2500	-25.90	0.0021415	0.162	-0.154	0.0028343	-25.79	0.0028528	0.167	-0.158	0.3378	-0.217

TABELA PARA $K = 0.8$ TAMBF = 0.0 WAMB = 0.0 BETA = 1.0 PR = 0.70 SC = 0.55

CHI	TWF-I	OMEGA-I	NT-A	NW-A	OMEGA-A	TWF-F	OMEGA-F	NT-F	NW-F	NURE-F	DFI-F
0.0000	-3.82	0.000000	0.000	0.000	0.000000	-3.82	0.000000	0.000	0.000	0.2926	-0.268
0.0001	-4.44	0.000008	0.068	-0.016	0.000009	-4.19	0.000009	0.075	-0.016	0.3141	-0.263
0.0005	-5.16	0.000042	0.121	-0.033	0.000053	-4.74	0.000054	0.137	-0.035	0.3305	-0.258
0.0008	-5.49	0.000068	0.139	-0.041	0.000087	-5.02	0.000090	0.160	-0.043	0.3360	-0.255
0.0010	-5.67	0.000085	0.151	-0.046	0.000111	-5.17	0.000115	0.174	-0.048	0.3396	-0.254
0.0020	-6.34	0.000171	0.175	-0.060	0.000230	-5.79	0.000239	0.203	-0.063	0.3463	-0.249
0.0050	-7.54	0.000428	0.203	-0.084	0.000599	-6.97	0.000624	0.233	-0.089	0.3532	-0.241
0.0070	-8.09	0.000599	0.210	-0.093	0.000847	-7.52	0.000881	0.240	-0.099	0.3548	-0.238
0.0100	-8.73	0.000856	0.217	-0.104	0.001221	-8.17	0.001268	0.246	-0.111	0.3561	-0.234
0.0200	-10.15	0.001713	0.218	-0.123	0.002447	-9.65	0.002528	0.244	-0.130	0.3555	-0.227
0.0300	-11.08	0.002569	0.215	-0.132	0.003654	-10.63	0.003761	0.237	-0.140	0.3540	-0.224
0.0400	-11.78	0.003426	0.210	-0.138	0.004843	-11.36	0.004970	0.230	-0.145	0.3525	-0.222
0.0500	-12.34	0.004283	0.205	-0.141	0.006018	-11.95	0.006161	0.223	-0.148	0.3510	-0.221
0.0600	-12.81	0.005139	0.201	-0.142	0.007179	-12.44	0.007336	0.217	-0.150	0.3496	-0.220
0.0700	-13.21	0.005996	0.197	-0.143	0.008329	-12.87	0.008498	0.212	-0.151	0.3484	-0.220
0.0800	-13.56	0.006853	0.193	-0.143	0.009469	-13.23	0.009648	0.207	-0.151	0.3472	-0.220
0.0900	-13.87	0.007709	0.189	-0.143	0.010600	-13.56	0.010788	0.202	-0.150	0.3462	-0.220
0.1000	-14.15	0.008566	0.186	-0.143	0.011731	-13.85	0.011928	0.199	-0.150	0.3453	-0.220
0.1200	-14.63	0.010279	0.180	-0.142	0.013955	-14.36	0.014166	0.191	-0.148	0.3435	-0.221
0.1300	-14.84	0.011136	0.177	-0.141	0.015058	-14.58	0.015274	0.188	-0.147	0.3427	-0.221
0.1500	-15.22	0.012849	0.172	-0.143	0.017242	-14.98	0.017473	0.181	-0.146	0.3413	-0.221
0.1700	-15.54	0.014562	0.167	-0.142	0.019411	-15.32	0.019652	0.176	-0.148	0.3400	-0.221
0.2000	-15.96	0.017132	0.161	-0.141	0.022632	-15.76	0.022887	0.169	-0.146	0.3382	-0.221
0.2200	-16.21	0.018845	0.157	-0.140	0.024762	-16.01	0.025025	0.165	-0.145	0.3372	-0.222
0.2500	-16.53	0.021415	0.152	-0.139	0.027934	-16.35	0.028206	0.159	-0.143	0.3358	-0.222

TABELA PARA K= 0.8 TAMBF= 10.0 WAMB= 0.0 BETA= 1.0 PR= 0.70 SC= 0.55

CHI	TWF-I	OMEGA-I	NT-A	NW-A	OMEGA-A	TWF-F	OMEGA-F	NT-F	NW-F	NURE-F	DFI-F
0.0000	4.17	0.000000	0.000	0.000	0.000000	4.17	0.000000	0.000	0.000	0.2926	-0.268
0.0001	3.63	0.000008	0.041	-0.013	0.000009	3.88	0.000009	0.044	-0.013	0.3056	-0.264
0.0005	3.01	0.000042	0.077	-0.028	0.000049	3.45	0.000050	0.086	-0.029	0.3173	-0.259
0.0008	2.73	0.000068	0.091	-0.034	0.000081	3.23	0.000082	0.103	-0.036	0.3218	-0.257
0.0010	2.57	0.000085	0.100	-0.040	0.000102	3.12	0.000105	0.115	-0.041	0.3248	-0.256
0.0020	1.99	0.000171	0.122	-0.050	0.000213	2.62	0.000219	0.140	-0.056	0.3312	-0.251
0.0050	0.93	0.000428	0.150	-0.071	0.000556	1.63	0.000577	0.175	-0.076	0.3398	-0.245
0.0070	0.44	0.000599	0.159	-0.079	0.000789	1.16	0.000820	0.186	-0.085	0.3423	-0.242
0.0100	-0.12	0.000856	0.168	-0.089	0.001142	0.59	0.001183	0.196	-0.096	0.3446	-0.239
0.0200	-1.41	0.001713	0.176	-0.106	0.002312	-0.72	0.002399	0.203	-0.114	0.3464	-0.233
0.0300	-2.26	0.002569	0.177	-0.115	0.003474	-1.62	0.003595	0.202	-0.124	0.3462	-0.229
0.0400	-2.90	0.003426	0.176	-0.120	0.004625	-2.30	0.004775	0.199	-0.129	0.3455	-0.227
0.0500	-3.41	0.004283	0.174	-0.124	0.005766	-2.85	0.005940	0.196	-0.133	0.3446	-0.226
0.0600	-3.85	0.005139	0.172	-0.127	0.006897	-3.31	0.007093	0.192	-0.136	0.3438	-0.225
0.0700	-4.22	0.005996	0.170	-0.129	0.008019	-3.71	0.008234	0.188	-0.138	0.3429	-0.224
0.0800	-4.54	0.006853	0.167	-0.130	0.009134	-4.06	0.009366	0.185	-0.139	0.3421	-0.224
0.0900	-4.83	0.007709	0.165	-0.131	0.010241	-4.37	0.010489	0.182	-0.140	0.3413	-0.224
0.1000	-5.09	0.008566	0.163	-0.132	0.011349	-4.64	0.011612	0.179	-0.141	0.3407	-0.223
0.1200	-5.54	0.010279	0.159	-0.133	0.013533	-5.13	0.013820	0.173	-0.141	0.3393	-0.223
0.1300	-5.73	0.011136	0.157	-0.133	0.014617	-5.34	0.014915	0.171	-0.141	0.3387	-0.223
0.1500	-6.09	0.012849	0.153	-0.133	0.016771	-5.72	0.017089	0.166	-0.141	0.3375	-0.223
0.1700	-6.40	0.014562	0.149	-0.133	0.018909	-6.05	0.019244	0.161	-0.140	0.3364	-0.223
0.2000	-6.79	0.017132	0.144	-0.132	0.022089	-6.47	0.022447	0.155	-0.139	0.3350	-0.224
0.2200	-7.02	0.018845	0.142	-0.132	0.024194	-6.72	0.024564	0.152	-0.138	0.3341	-0.224
0.2500	-7.33	0.021415	0.138	-0.131	0.027330	-7.05	0.027717	0.147	-0.137	0.3329	-0.225

TABELA PARA K= 0.8 TAMBF= 20.0 WAMB= 0.0 BETA= 1.0 PR= 0.70 SC= 0.55

CHI	TWF-I	OMEGA-I	NT-A	NW-A	OMEGA-A	TWF-F	OMEGA-F	NT-F	NW-F	NURE-F	DFI-F
0.0000	11.54	0.0000000	0.000	0.000	0.0000000	11.54	0.0000000	0.000	0.000	0.2926	-0.268
0.0001	11.10	0.0000008	0.024	-0.010	0.0000008	11.31	0.0000009	0.025	-0.010	0.3002	-0.265
0.0005	10.60	0.0000042	0.047	-0.022	0.0000046	11.00	0.0000047	0.051	-0.023	0.3077	-0.261
0.0008	10.36	0.0000068	0.057	-0.027	0.0000076	10.84	0.0000077	0.063	-0.028	0.3109	-0.260
0.0010	10.23	0.0000085	0.063	-0.030	0.0000096	10.76	0.0000097	0.070	-0.032	0.3129	-0.258
0.0020	9.75	0.000171	0.079	-0.040	0.000198	10.38	0.000202	0.090	-0.043	0.3182	-0.255
0.0050	8.86	0.000428	0.102	-0.057	0.000517	9.62	0.000531	0.119	-0.062	0.3260	-0.249
0.0070	8.45	0.000599	0.111	-0.064	0.000733	9.25	0.000756	0.130	-0.070	0.3287	-0.247
0.0100	7.97	0.000856	0.120	-0.072	0.001063	8.80	0.001099	0.141	-0.079	0.3315	-0.244
0.0200	6.87	0.001713	0.132	-0.087	0.002166	7.70	0.002244	0.155	-0.096	0.3349	-0.239
0.0300	6.13	0.002569	0.136	-0.096	0.003271	6.93	0.003387	0.159	-0.105	0.3360	-0.236
0.0400	5.57	0.003426	0.138	-0.101	0.004372	6.34	0.004522	0.160	-0.111	0.3362	-0.234
0.0500	5.12	0.004283	0.138	-0.105	0.005468	5.85	0.005648	0.160	-0.115	0.3361	-0.232
0.0600	4.74	0.005139	0.138	-0.107	0.006559	5.44	0.006766	0.159	-0.118	0.3358	-0.231
0.0700	4.41	0.005996	0.137	-0.109	0.007643	5.08	0.007876	0.157	-0.120	0.3354	-0.231
0.0800	4.13	0.006853	0.136	-0.111	0.008723	4.77	0.008978	0.155	-0.121	0.3350	-0.230
0.0900	3.87	0.007709	0.135	-0.112	0.009798	4.49	0.010074	0.153	-0.122	0.3345	-0.230
0.1000	3.64	0.008566	0.134	-0.113	0.010874	4.24	0.011170	0.152	-0.123	0.3342	-0.230
0.1200	3.24	0.010279	0.132	-0.114	0.013000	3.80	0.013332	0.148	-0.124	0.3333	-0.229
0.1300	3.06	0.011136	0.131	-0.114	0.014058	3.60	0.014405	0.147	-0.124	0.3328	-0.229
0.1500	2.74	0.012849	0.128	-0.115	0.016163	3.25	0.016538	0.143	-0.124	0.3320	-0.229
0.1700	2.47	0.014562	0.125	-0.126	0.018216	2.95	0.018656	0.140	-0.124	0.3312	-0.229
0.2000	2.11	0.017132	0.123	-0.114	0.021375	2.58	0.021800	0.136	-0.133	0.3301	-0.226
0.2200	1.90	0.018845	0.121	-0.114	0.023441	2.33	0.023892	0.133	-0.123	0.3295	-0.230
0.2500	1.62	0.021415	0.118	-0.113	0.026522	2.02	0.027000	0.130	-0.121	0.3286	-0.230

TABELA PARA K= 0.4 TAMBF= -10.0 WAMB= 0.0 BETA= 1.0 PR= 0.70 SC= 0.55

CHI	TWF-I	OMEGA-I	NT-A	NW-A	OMEGA-A	TWF-F	OMEGA-F	NT-F	NW-F	NURE-F	DFI-F
0.0000	-12.39	0.000000	0.000	0.000	0.000000	-12.39	0.000000	0.000	0.000	0.2926	-0.268
0.0001	-14.63	0.000008	0.240	-0.060	0.000012	-14.16	0.000013	0.274	-0.062	0.3622	-0.249
0.0005	-17.23	0.000042	0.314	-0.126	0.000068	-16.68	0.000071	0.353	-0.130	0.3784	-0.227
0.0008	-18.42	0.000068	0.330	-0.157	0.000111	-17.86	0.000116	0.368	-0.162	0.3814	-0.216
0.0010	-19.07	0.000085	0.344	-0.179	0.000141	-18.49	0.000147	0.382	-0.184	0.3843	-0.207
0.0020	-21.51	0.000171	0.351	-0.240	0.000286	-20.93	0.000296	0.386	-0.248	0.3850	-0.180
0.0050	-25.91	0.000428	0.352	-0.335	0.000716	-25.35	0.000737	0.380	-0.352	0.3839	-0.124
0.0070	-27.91	0.000599	0.350	-0.343	0.000999	-27.41	0.001023	0.372	-0.367	0.3823	-0.115
0.0100	-30.27	0.000856	0.344	-0.412	0.001419	-29.80	0.001450	0.365	-0.402	0.3808	-0.091
0.0120	-31.56	0.001027	0.337	-0.500							
0.0150	-33.22	0.001284	0.331	-0.518							
0.0170	-34.20	0.001456	0.328	-0.522							
0.0200	-35.51	0.001713	0.323	-0.518							
0.0220	-36.30	0.001884	0.319	-0.509							
0.0250	-37.39	0.002141	0.315	-0.487	0.003438						
0.0270	-38.06	0.002312	0.312	-0.468	0.003702	-37.73	0.003748	0.324	-0.493	0.3726	-0.007
0.0300	-39.00	0.002569	0.308	-0.433	0.004095	-38.72	0.004135	0.317	-0.455	0.3712	-0.046

TABELA PARA K= 0.4 TAMBF= 0.0 WAMB= 0.0 BETA= 1.0 PR= 0.70 SC= 0.55

CHI	TWF-I	OMEGA-I	NT-A	NW-A	OMEGA-A	TWF-F	OMEGA-F	NT-F	NW-F	NURE-F	DFI-F
0.0000	-3.82	0.000000	0.000	0.000	0.000000	-3.82	0.000000	0.000	0.000	0.2926	-0.268
0.0001	-5.94	0.000008	0.176	-0.057	0.000011	-5.33	0.000012	0.204	-0.058	0.3466	-0.251
0.0005	-8.41	0.000042	0.258	-0.120	0.000064	-7.62	0.000067	0.300	-0.125	0.3677	-0.229
0.0008	-9.55	0.000068	0.280	-0.148	0.000105	-8.71	0.000111	0.324	-0.156	0.3726	-0.218
0.0010	-10.18	0.000085	0.295	-0.168	0.000134	-9.30	0.000141	0.342	-0.177	0.3763	-0.210
0.0020	-12.55	0.000171	0.314	-0.219	0.000274	-11.66	0.000288	0.358	-0.233	0.3795	-0.187
0.0050	-16.86	0.000428	0.327	-0.306	0.000697	-16.00	0.000725	0.366	-0.322	0.3810	-0.142
0.0070	-18.82	0.000599	0.327	-0.350	0.000975	-17.98	0.001014	0.364	-0.367	0.3806	-0.115
0.0100	-21.15	0.000856	0.326	-0.408	0.001392	-20.29	0.001446	0.362	-0.429	0.3803	-0.070
0.0200	-26.38	0.001713	0.312	-0.487	0.002741						
0.0300	-29.88	0.002569	0.300	-0.481	0.004058	-29.42	0.004127	0.315	-0.439	0.3709	-0.061
0.0400	-32.52	0.003426	0.288	-0.637							
0.0500	-34.65	0.004283	0.280	-0.630							
0.0600	-36.45	0.005139	0.273	-0.597							
0.0700	-38.00	0.005996	0.267	-0.543							
0.0800	-39.36	0.006853	0.261	-0.475	0.010335	-39.10	0.010414	0.267	-0.499	0.3608	-0.000

TABELA PARA K= 0.4 - TAMBF= 10.0 WAMB= 0.0 BETA= 1.0 PR= 0.70 SC= 0.55

CHI	TWF-I	OMEGA-I	NT-A	NW-A	OMEGA-A	TWF-F	OMEGA-F	NT-F	NW-F	NURE-F	DFI-F
0.0000	4.17	0.000000	0.000	0.000	0.000000	4.17	0.000000	0.000	0.000	0.2926	-0.268
0.0001	2.22	0.000008	0.124	-0.051	0.000010	2.92	0.000011	0.143	-0.052	0.3320	-0.252
0.0005	-0.09	0.000042	0.202	-0.106	0.000059	0.95	0.000062	0.240	-0.113	0.3547	-0.233
0.0008	-1.16	0.000068	0.226	-0.132	0.000098	-0.03	0.000104	0.269	-0.141	0.3611	-0.223
0.0010	-1.75	0.000085	0.241	-0.150	0.000126	-0.55	0.000133	0.289	-0.161	0.3654	-0.216
0.0020	-4.00	0.000171	0.268	-0.200	0.000260	-2.73	0.000276	0.319	-0.215	0.3716	-0.194
0.0050	-8.12	0.000428	0.293	-0.293	0.000670	-6.80	0.000710	0.345	-0.316	0.3770	-0.145
0.0070	-10.02	0.000599	0.298	-0.332	0.000944	-8.69	0.000999	0.349	-0.361	0.3778	-0.119
0.0100	-12.28	0.000856	0.303	-0.376	0.001356	-10.95	0.001432	0.353	-0.414	0.3785	-0.082
0.0200	-17.44	0.001713	0.297	-0.455	0.002694	-16.26	0.002818	0.337	-0.489	0.3753	-0.011
0.0300	-20.90	0.002569	0.288	-0.522							
0.0400	-23.54	0.003426	0.280	-0.568							
0.0500	-25.67	0.004283	0.273	-0.585							
0.0600	-27.47	0.005139	0.267	-0.564							
0.0700	-29.03	0.005996	0.262	-0.504							
0.0800	-30.41	0.006853	0.254	-0.705							
0.0900	-31.63	0.007709	0.249	-0.711							
0.1000	-32.73	0.008566	0.246	-0.713							
0.1200	-34.66	0.010279	0.238	-0.691							
0.1300	-35.51	0.011136	0.235	-0.673							
0.1500	-37.04	0.012849	0.228	-0.622							
0.1700	-38.39	0.014562	0.223	-0.558							

TABELA PARA K= 0.0 TAMRF= 20.0 WAMB= 0.0 BETA= 1.0 PR= 0.70 SC= 0.55

CHI	TWF-I	OMEGA-I	NT-A	NW-A	OMEGA-A	TWF-F	OMEGA-F	NT-F	NW-F	NURE-F	DFI-F
0.0000	11.54	0.000000	0.000	0.000	0.000000	11.54	0.000000	0.000	0.000	0.2926	-0.268
0.0001	8.41	0.000008	0.136	-0.079	0.000010	9.56	0.000011	0.159	-0.083	0.3360	-0.243
0.0005	4.62	0.000042	0.220	-0.174	0.000061	6.39	0.000065	0.272	-0.188	0.3618	-0.205
0.0008	2.83	0.000068	0.246	-0.219	0.000101	4.80	0.000109	0.309	-0.240	0.3695	-0.183
0.0010	1.84	0.000085	0.263	-0.253	0.000129	3.98	0.000140	0.335	-0.280	0.3749	-0.164
0.0020	-1.99	0.000171	0.294	-0.343	0.000268	0.46	0.000294	0.379	-0.389	0.3837	-0.100
0.0050	-9.23	0.000428	0.324	-0.525							
0.0070	-12.63	0.000599	0.331	-0.598							
0.0100	-16.75	0.000856	0.336	-0.689							
0.0200	-26.28	0.001713	0.330	-0.905							
0.0300	-32.82	0.002569	0.320	-1.146							
0.0400	-37.88	0.003426	0.315	-0.988							

TABELA PARA K= 1.6 TAMBF= -10.0 WAMB= 0.0 BETA= 0.0 PR= 0.70 SC= 0.55

CHI	TWF-I	OMEGA-I	NT-A	NW-A	OMEGA-A	TWF-F	OMEGA-F	NT-F	NW-F	NURE-F	DFI-F
0.0000	-12.39	0.000000	0.000	0.000	0.000000	-12.39	0.000000	0.000	0.000	0.2926	-0.268
0.0001	-6.17	0.000008	0.811	0.167	0.000020	-5.50	0.000019	0.711	0.171	0.4402	-0.311
0.0005	1.11	0.000042	0.575	0.333	0.000087	1.51	0.000086	0.564	0.338	0.4169	-0.345
0.0008	4.44	0.000068	0.540	0.400	0.000136	4.69	0.000135	0.537	0.404	0.4123	-0.357
0.0010	6.26	0.000085	0.536	0.439	0.000169	6.44	0.000169	0.534	0.442	0.4119	-0.363
0.0020	13.05	0.000171	0.483	0.549	0.000324	12.87	0.000324	0.484	0.546	0.4030	-0.380
0.0050	24.79	0.000428	0.416	0.682	0.000762	23.80	0.000763	0.416	0.666	0.3907	-0.398
0.0070	29.84	0.000599	0.390	0.715	0.001041	28.44	0.001040	0.389	0.695	0.3855	-0.403
0.0080	32.00	0.000687	0.386	0.722	0.001189	30.46	0.001187	0.384	0.703	0.3846	-0.404
0.0089						32.00	0.001306	0.376	0.707	0.3831	-0.404

TABELA PARA

K= 1.6

TAMBF= 20.0

WAMB= 0.0

BETA= 0.0

PR= 0.70

SC= 0.55

CHI	TWF-I	OMEGA-I	NT-A	NW-A	OMEGA-A	TWF-F	OMEGA-F	NT-F	NW-F	NURE-F	DFI-F
0.0000	11.54	0.000000	0.000	0.000	0.000000	11.54	0.000000	0.000	0.000	0.2926	-0.268
0.0001	16.74	0.000008	-0.781	0.124							
0.0005	22.64	0.000042	1.924	0.241		25.16	0.000120	1.060	0.258	0.4905	-0.329
0.0008	25.26	0.000068	1.160	0.288	0.000204	27.33	0.000173	0.884	0.303	0.4654	-0.338
0.0010	26.69	0.000085	1.017	0.315	0.000234	28.58	0.000210	0.836	0.329	0.4586	-0.343
0.0020	32.00	0.000172	0.717	0.387	0.000392	33.25	0.000380	0.672	0.395	0.4343	-0.355
0.0017						31.99	0.000328	0.704	0.380	0.4392	-0.352

TABELA PARA K= 0.8 TAMBF= -10.0 WAMB= 0.0 BETA= 0.0 PR= 0.70 SC= 0.55

CHI	TWF-I	OMEGA-I	NT-A	NW-A	OMEGA-A	TWF-F	OMEGA-F	NT-F	NW-F	NURE-F	DFI-F
0.0000	-12.39	0.000000	0.000	0.000	0.000000	-12.39	0.000000	0.000	0.000	0.2926	-0.268
0.0001	-9.25	0.000008	2.120	0.087		-8.37	0.000023	1.015	0.090	0.4840	-0.292
0.0005	-5.46	0.000042	0.746	0.182	0.000099	-4.82	0.000094	0.673	0.187	0.4345	-0.314
0.0008	-3.68	0.000068	0.668	0.224	0.000150	-3.11	0.000146	0.628	0.229	0.4274	-0.323
0.0010	-2.69	0.000085	0.652	0.250	0.000185	-2.14	0.000181	0.622	0.256	0.4264	-0.329
0.0020	1.11	0.000171	0.577	0.333	0.000351	1.50	0.000348	0.566	0.341	0.4172	-0.345
0.0050	8.26	0.000428	0.511	0.470	0.000832	8.33	0.000831	0.511	0.472	0.4078	-0.368
0.0070	11.61	0.000599	0.489	0.526	0.001142	11.50	0.001143	0.490	0.525	0.4041	-0.377
0.0100	15.62	0.000856	0.467	0.587	0.001601	15.28	0.001603	0.469	0.580	0.4004	-0.385
0.0200	24.79	0.001713	0.416	0.682	0.003052	23.80	0.003054	0.416	0.666	0.3908	-0.398
0.0300	30.92	0.002569	0.385	0.719	0.004442	29.44	0.004437	0.384	0.700	0.3846	-0.403
0.0321	32.00	0.002750	0.381	0.722	0.004734	30.43	0.004726	0.379	0.703	0.3836	-0.404
0.0356						32.00	0.005211	0.372	0.706	0.3823	-0.404

TABELA PARA K= 0.8 TAMBF= 20.0 WAMB= 0.0 BETA= 0.0 PR= 0.70 SC= 0.55

CHI	TWF-I	OMEGA-I	NT-A	NW-A	OMEGA-A	TWF-F	OMEGA-F	NT-F	NW-F	NURE-F	DFI-F
0.0000	11.54	0.000000	0.000	0.000	0.000000	11.54	0.000000	0.000	0.000	0.2926	-0.268
0.0001	14.19	0.000008	-0.228	0.065	0.000004	12.29	0.000005	-0.161	0.061	0.2364	-0.284
0.0005	17.33	0.000042	-1.026	0.137							
0.0008	18.77	0.000068	-2.811	0.164							
0.0010	19.58	0.000085	-9.290	0.184							
0.0020	22.64	0.000171	1.932	0.241		25.17	0.000482	1.064	0.259	0.4911	-0.329
0.0050	28.23	0.000428	0.876	0.336	0.001078	29.90	0.001004	0.764	0.348	0.4481	-0.346
0.0080	32.00	0.000690	0.713	0.386	0.001564	33.24	0.001517	0.669	0.394	0.4337	-0.355
0.0068						31.99	0.001311	0.699	0.378	0.4384	-0.352

TABELA PARA K= 0.4 TAMBF= 20.0 WAMB= 0.0 BETA= 1.0 PR= 0.70 SC= 0.55

CHI	TWF-I	OMEGA-I	NT-A	NW-A	OMEGA-A	TWF-F	OMEGA-F	NT-F	NW-F	NURE-F	DFI-F
0.0000	11.54	0.000000	0.000	0.000	0.000000	11.54	0.000000	0.000	0.000	0.2926	-0.268
0.0001	9.77	0.000008	0.086	-0.044	0.000010	10.51	0.000010	0.097	-0.046	0.3201	-0.254
0.0005	7.66	0.000042	0.151	-0.094	0.000055	8.89	0.000058	0.180	-0.100	0.3409	-0.237
0.0008	6.68	0.000068	0.174	-0.117	0.000092	8.06	0.000096	0.210	-0.126	0.3479	-0.228
0.0010	6.13	0.000085	0.189	-0.134	0.000117	7.62	0.000124	0.230	-0.144	0.3525	-0.222
0.0020	4.05	0.000171	0.219	-0.180	0.000245	5.71	0.000260	0.269	-0.196	0.3611	-0.202
0.0050	0.18	0.000428	0.254	-0.263	0.000640	2.02	0.000686	0.314	-0.293	0.3705	-0.158
0.0070	-1.62	0.000599	0.263	-0.300	0.000906	0.24	0.000972	0.324	-0.335	0.3727	-0.135
0.0100	-3.78	0.000856	0.272	-0.346	0.001308	-1.86	0.001405	0.335	-0.388	0.3749	-0.101
0.0200	-8.76	0.001713	0.275	-0.438	0.002627	-6.81	0.002818	0.337	-0.494	0.3754	-0.006
0.0300	-12.14	0.002569	0.272	-0.486	0.003926						
0.0400	-14.74	0.003426	0.268	-0.502							
0.0500	-16.86	0.004283	0.262	-0.536							
0.0600	-18.65	0.005139	0.257	-0.563							
0.0700	-20.20	0.005996	0.252	-0.588							
0.0800	-21.57	0.006853	0.248	-0.610							
0.0900	-22.79	0.007709	0.243	-0.627							
0.1000	-23.89	0.008566	0.240	-0.641							
0.1200	-25.83	0.010279	0.233	-0.641							
0.1300	-26.69	0.011136	0.230	-0.629							
0.1500	-28.23	0.012849	0.225	-0.581							
0.1700	-29.59	0.014562	0.220	-0.537							
0.2000	-31.36	0.017132	0.211	-0.744							
0.2200	-32.40	0.018845	0.207	-0.738							
0.2500	-33.78	0.021415	0.201	-0.720							

TABELA PARA K= 0.0 TAMRF= -10.0 WAMB= 0.0 BETA= 1.0 PR= 0.70 SC= 0.55

CHI	TWF-I	OMEGA-I	NT-A	NW-A	OMEGA-A	TWF-F	OMEGA-F	NT-F	NW-F	NURE-F	DFI-F
0.0000	-12.39	0.000000	0.000	0.000	0.000000	-12.39	0.000000	0.000	0.000	0.2926	-0.268
0.0001	-16.19	0.000008	0.305	-0.104	0.000013	-15.64	0.000014	0.347	-0.107	0.3772	-0.235
0.0005	-20.64	0.000042	0.366	-0.227	0.000072	-20.00	0.000075	0.406	-0.235	0.3887	-0.186
0.0008	-22.68	0.000068	0.377	-0.287	0.000117	-22.01	0.000122	0.416	-0.298	0.3907	-0.155
0.0010	-23.80	0.000085	0.389	-0.329	0.000148	-23.10	0.000154	0.430	-0.343	0.3933	-0.130
0.0020	-28.04	0.000171	0.392	-0.386	0.000298	-27.39	0.000307	0.423	-0.419	0.3920	-0.078
0.0050	-35.72	0.000428	0.383	-0.614							
0.0070	-39.24	0.000599	0.379	-0.520							

TABELA PARA K= 0.0 TAMBF= 0.0 WAMB= 0.0 BETA= 1.0 PR= 0.70 SC= 0.55

CHI	TWF-I	OMEGA-I	NT-A	NW-A	OMEGA-A	TWF-F	OMEGA-F	NT-F	NW-F	NURE-F	DFI-F
0.0000	-3.82	0.000000	0.000	0.000	0.000000	-3.82	0.000000	0.000	0.000	0.2926	-0.268
0.0001	-7.45	0.000008	0.243	-0.099	0.000012	-6.66	0.000013	0.284	-0.103	0.3643	-0.236
0.0005	-11.74	0.000042	0.323	-0.211	0.000069	-10.77	0.000073	0.373	-0.224	0.3824	-0.191
0.0008	-13.73	0.000068	0.342	-0.257	0.000113	-12.73	0.000119	0.391	-0.275	0.3860	-0.167
0.0010	-14.84	0.000085	0.356	-0.293	0.000143	-13.78	0.000151	0.409	-0.314	0.3893	-0.147
0.0020	-19.02	0.000171	0.366	-0.398	0.000290	-17.91	0.000305	0.417	-0.420	0.3908	-0.076
0.0050	-26.65	0.000428	0.370	-0.577							
0.0070	-30.18	0.000599	0.366	-0.665							
0.0100	-34.35	0.000856	0.362	-0.825							

TABELA PARA K= 0.0 TAMBF= 10.0 WAMB= 0.0 BETA= 1.0 PR= 0.70 SC= 0.55

CHI	TWF-I	OMEGA-I	NT-A	NW-A	OMEGA-A	TWF-F	OMEGA-F	NT-F	NW-F	NURE-F	DFI-F
0.0000	4.17	0.000000	0.000	0.000	0.000000	4.17	0.000000	0.000	0.000	0.2926	-0.268
0.0001	0.78	0.000008	0.185	-0.089	0.000011	1.78	0.000012	0.218	-0.095	0.3498	-0.239
0.0005	-3.30	0.000042	0.272	-0.192	0.000065	-1.93	0.000069	0.327	-0.206	0.3733	-0.198
0.0008	-5.20	0.000068	0.296	-0.242	0.000107	-3.73	0.000114	0.356	-0.260	0.3790	-0.174
0.0010	-6.25	0.000085	0.312	-0.278	0.000137	-4.68	0.000147	0.378	-0.301	0.3835	-0.154
0.0020	-10.29	0.000171	0.333	-0.377	0.000280	-8.54	0.000302	0.405	-0.416	0.3886	-0.080
0.0050	-17.79	0.000428	0.350	-0.546							
0.0070	-21.28	0.000599	0.351	-0.648							
0.0100	-25.44	0.000856	0.351	-0.753							
0.0200	-35.01	0.001713	0.338	-0.979							

NOMENCLATURA

c_p ,	calor específico a pressão constante ;
D ,	coeficiente de difusão binário ;
e_p ,	carga térmica interna / tempo-área ;
$e_{r(1)}$,	energia radiante térmica absorvida pela placa / tempo - - área ;
e ,	soma de e_p e $e_{r(1)}$;
$e_{r(2)}$,	energia radiante térmica emitida pela placa / tempo - - área ;
f ,	"stream function" adimensional ;
f_w ,	valor de f na parede ;
h , h^*	coeficientes locais de transferência de calor ;
h_r ,	coeficiente de radiação , $\epsilon \sigma T_\infty^3$;
h_s ,	calor latente de sublimação ;
K ,	parâmetro de radiação-fonte , $e / \epsilon \sigma T_\infty^4$;
k ,	condutividade térmica ;
M ,	massa molecular do material da parede ;
M_g ,	massa molecular do gás da corrente livre ;
\dot{m} ,	taxa local de sublimação por unidade de área ;
Nu_x ,	número de Nusselt , $h x / k$
n_T ,	parâmetro de variação da temperatura da parede, equação(30);
n_W ,	parâmetro de variação da fração mássica na parede , equa ção (30) ;
Pr ,	número de Prandtl , $\mu c_p / k$;

p ,	pressão total (soma das pressões parciais) ;
p_v ,	pressão parcial de vapor do gás sublimado ;
p_∞ ,	pressão estática do meio ambiente ;
q_c ,	fluxo local de calor por convecção por unidade de área ;
q_s ,	sumidouro de calor devido à sublimação (energia / tempo - área) ;
Re_x ,	número de Reynolds, $U_\infty x / \nu$;
Sc ,	número de Schmidt , ν / D ;
T ,	temperatura ;
T_∞ ,	temperatura da corrente livre ;
U_∞ ,	velocidade da corrente livre ;
u ,	componente longitudinal da velocidade ;
v ,	componente transversal da velocidade ;
v_c ,	velocidade convectiva ;
W ,	fração mássica do gás sublimado ;
W_g ,	fração mássica do gás da corrente livre ;
W_∞ ,	fração mássica do gás sublimado na corrente livre ;
x ,	coordenada longitudinal ;
y ,	coordenada transversal ;
z ,	função auxiliar, equação (40) ;

Símbolos gregos :

α ,	difusividade térmica ;
δ_T ,	espessura da camada limite térmica ;
δ_W ,	espessura da camada limite de difusão ;
ϵ ,	"emittance" ;

η ,	variável de similaridade , equação (24) ;
θ ,	temperatura adimensional , equação (25) ;
μ ,	viscosidade absoluta ;
ν ,	viscosidade cinemática ;
ξ ,	variável de similaridade local , equação (24) ;
ρ ,	densidade ;
σ ,	constante de Stefan - Boltzmann ;
ϕ ,	fração mássica adimensional, equação (25) ;
x ,	coordenada adimensional , equação (9) ;
ψ ,	"stream function" , equação (23) ;
Ω ,	coordenada logitudinal proporcional a x , equações (41) e (42).

Índices:

g ,	gás da corrente livre ;
w ,	superfície da placa , $y = 0$;
o ,	origem da placa, $x = 0$;
∞ ,	corrente livre.

[illegible]